MAX

4 B

NOVA

VWO|GYMNASIUM

Natuurkunde



MALMBERG

NAAM EN KLAS:



NATUURKUNDE

4 VWO | GYMNASIUM

Deel B

Auteurs

Hans van Bemmel

Lodewijk Koopman

Eindredactie

Claud Biemans

Met medewerking van

Peter van Hoeflaken

Rein Tromp



Release 2021

Malmberg ’s-Hertogenbosch

www.malmberg.nl/nova-natuurkunde

Inhoud Deel A

Inhoud Deel B

*keuzestof schoolexamen

Voorwoord

Nova is op zo'n manier opgebouwd, dat je de stof vanuit verschillende invalshoeken kunt benaderen. Elk hoofdstuk bestaat namelijk uit drie delen:
P: de praktijk; voorbeelden van toepassingen van de theorie.
T: de theorie; uitleg over natuurkundige concepten, modellen en experimenten. Aan het begin van iedere paragraaf staan leerdoelen vermeld. Deze zijn afgeleid van de eindtermen uit de syllabus, waarin staat wat je voor je centraal examen allemaal moet kunnen. Ook de keuzehoofdstukken (voor de schoolexamens) hebben leerdoelen.
M: de maatschappij; waarom is kennis van de theorie belangrijk voor jou, als onderdeel van die maatschappij?
Bij alle drie de delen horen opdrachten.

Jouw eigen werkwijze

Je begint elk hoofdstuk met enkele oriënterende opdrachten in het boek. Deze opdrachten gaan over stof die je al eerder hebt geleerd en die je weer nodig hebt bij dit hoofdstuk. Wil je meer oefenen met voorkennis? Maak dan ook de digitale voorkennistoets. Vanzelfsprekend bepaal je samen met je docent hoe je de stof uit het hoofdstuk daarna gaat behandelen. Je kunt op verschillende manieren met *Nova* werken.

1 Vind je het belangrijk om eerst de **theoretische concepten** te bestuderen, om daarna te kijken hoe die theorie in de praktijk en de maatschappij wordt gebruikt? In dat geval begin je met het T-deel en doe je daarna het P-deel en een van de M-delen.
2 Ben je vooral geïnteresseerd in **toepassing**, begin dan met het P-deel. Daarna doe je het T-deel en een van de M-delen.
3 Wanneer je interesse vooral uitgaat naar het belang van natuurkunde voor de **maatschappij**, begin dan met een van de M-delen. De M-delen worden uitsluitend online aangeboden. Vervolgens doe je het P-deel of ga je direct naar het T-deel.

Iedereen sluit af met het beantwoorden van de eindopdracht aan het einde van het T-deel. Indien je de theorie voldoende beheerst, moet je de opdrachten van het P-deel kunnen oplossen.

Opdrachten

De opdrachten kennen een verschillende opbouw. Voor sommige opdrachten staat een **+**. Dat zijn extra pittige opdrachten. Bij sommige hoofdstukken zijn examenopgaven opgenomen. Soms zijn ze bewerkt ('*naar*'), soms zijn ze letterlijk overgenomen ('*bron*'). Zo word je goed voorbereid voor het examen. Als er een ⌛ staat, heb je te maken met een opdracht uit de natuurkunde-olympiade. Bij havo komt dat zelden voor, bij vwo gebeurt dat vaker. Dit zijn uitdagende opdrachten waarvoor je de theorie vaak op net een andere manier moet toepassen.

Oefenen

Was je in staat de opdrachten van het P-deel op te lossen, maar wil je toch nog kijken of je de stof echt beheerst? Maak dan de **Test jezelf**. Besef dat de **Onthoud!** aan het einde van de paragraaf slechts dient om de kern van de paragraaf nog eens aan te geven. Deze samenvattingen volstaan NIET om een toets voor te bereiden. Om te controleren of je de begrippen uit dit hoofdstuk beheerst, kun je de online **flitskaarten** gebruiken.

Wij wensen je succes en plezier met *Nova*!

De auteurs



HOOFDSTUK 4

Elektrische systemen

Elektrische systemen spelen een centrale rol in ons leven. Het hoogspanningsnetwerk brengt elektrische energie van centrales naar dorpen en steden, bedrijven en woningen. Treinen en metro's kunnen daardoor rijden en overal branden lampen. Thuis hoef je alleen maar een stekker in het stopcontact te steken als je een apparaat vol minuscule elektronica wilt gebruiken, of de batterij van je smartphone wilt opladen. In dit hoofdstuk leer je de begrippen waarmee je kunt inzien hoe al die apparaten en systemen functioneren.

Introductie

Praktijk

Theorie

Maatschappij

Wat weet je al over elektrische systemen?

Leerdoelen

1 Je kunt het energieverbruik van een elektrisch apparaat berekenen in de eenheid joule.
2 Je kunt de totale stroomsterkte en het totale opgenomen vermogen in een groep berekenen.
3 Je kunt uitleggen welke gevaren het gebruik van elektriciteit met zich meebrengt.
4 Je kunt berekeningen maken met het verband tussen weerstand, spanning en stroomsterkte.
5 Je kunt het verschil uitleggen tussen een ohmse weerstand en een niet-ohmse weerstand.
6 Je kunt beschrijven hoe de weerstand van een NTC of LDR afhangt van andere grootheden.
7 Je kunt de stroomsterkte I_1, I_2, I_3, … door elke weerstand in een parallelschakeling berekenen.

In de vorige leerjaren heb je al een aantal dingen geleerd over elektrische systemen. Je hebt deze kennis weer nodig wanneer je aan dit hoofdstuk begint. Wil je snel controleren wat je nog weet? Maak dan de volgende opdrachten.

Opdrachten voorkennis

1 Een bouwlamp (150 W) verbruikt 18 000 J aan elektrische energie.
Hoelang heeft de bouwlamp aangestaan? Geef je antwoord in het juiste aantal significante cijfers.

De bouwlamp heeft ________ minuten aangestaan.

2 Op een groep van een huisinstallatie zijn drie apparaten aangesloten. Op elk apparaat zit een typeplaatje waarop de spanning over en de stroomsterkte door het apparaat zijn vermeld:
- een stofzuiger: 230 V / 3,00 A;
- een lamp: 230 V / 0,10 A;
- een waterkoker: 230 V / 6,9 A.

Wat is het totale vermogen van de aangesloten apparaten? Rond af op één decimaal.

Het totale vermogen is ________ kW.

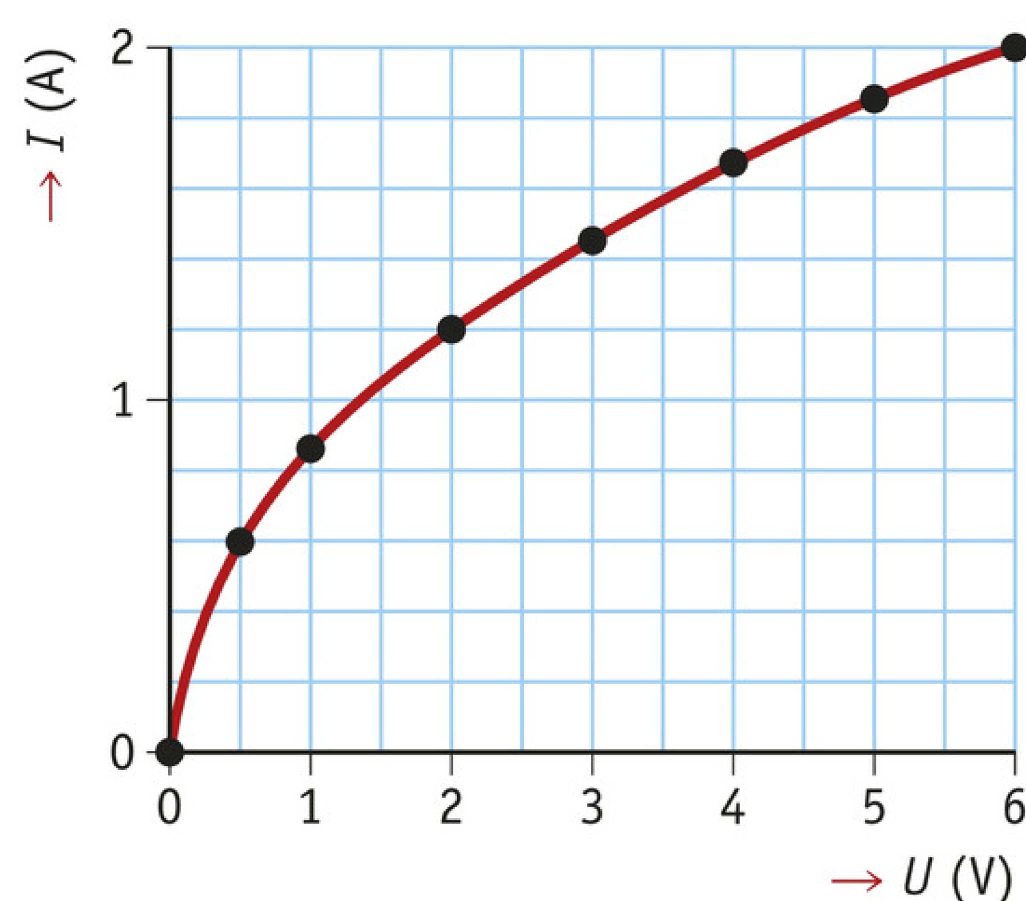
3 Op een groep zijn drie apparaten ingeschakeld met een totaal vermogen van 4000 W.
De schakelautomaat schakelt de groep uit.
Is hier sprake van kortsluiting of overbelasting?

Hier is sprake van ________________________________ .

4 Bij een webwinkel kun je reservelampjes kopen voor een zaklantaarn.
In de beschrijving staat:
Reservelamp voor zaklamp 3,5 V – 0,7 W – 200 mA
Fitting = E10 – Helder
Bereken de weerstand van het reservelampje als dit op de juiste spanning brandt.

De weerstand van het reservelampje is ________ Ω als het op de juiste spanning brandt.

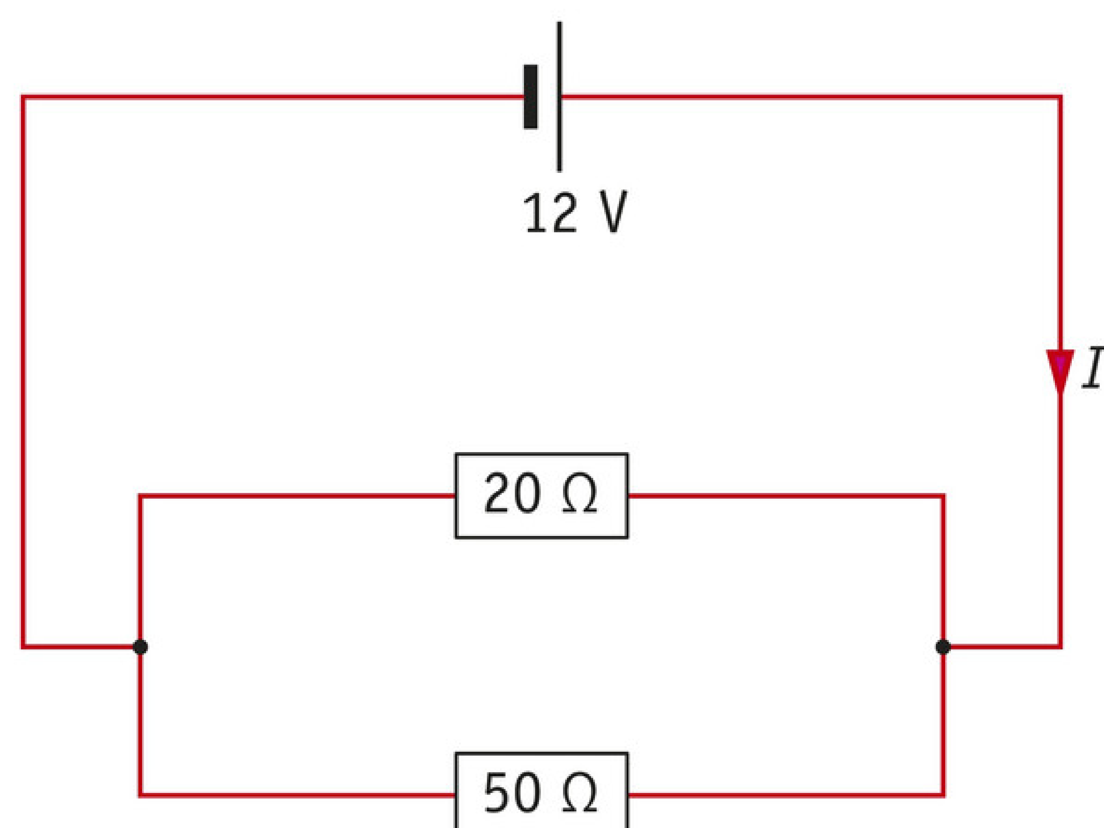
5 Zoë heeft enkele metingen verricht aan een zeer dunne metaaldraad. Haar resultaten heeft ze verwerkt in het (I, U)-diagram (afbeelding 1).
Wat kun je zeggen over de weerstand van de draad als er meer spanning over staat?
De weerstand *blijft gelijk* / *wordt groter* / *wordt kleiner*.



▲ **afbeelding 1**

6 Kies in de zinnen de juiste woorden.
Hoe zwakker het licht is dat op een LDR valt, des te *groter* / *kleiner* wordt zijn weerstand.
Als de zon fel schijnt, geleidt de LDR de stroom *beter* / *slechter*.

7 Bekijk de schakeling (afbeelding 2)



▲ **afbeelding 2**

Bereken de totale stroomsterkte in deze schakeling.
De totale stroomsterkte is ________ A.

 Wil je weten of je voldoende voorkennis hebt voor dit hoofdstuk, maak dan online de *Voorkennistoets*.

Praktijk

Swipen met geleiders

Sinds een aantal jaren worden er in Zuid-Korea in de winter extra veel worstjes verkocht van een bepaald merk. Wat blijkt: de worstjes worden gebruikt voor het bedienen van smartphones. Ook in de kou willen mensen hun telefoon gebruiken. Veel touchscreens reageren dan niet op in wol, katoen of leer gehulde vingers. Elektrische materiaaleigenschappen spelen tegenwoordig een rol bij het ontwerpen van handschoenen die net zo werken als vingers of Koreaanse worst. Natuurkundige principes helpen ondernemers aan de wensen van klanten te voldoen.



Verschillende schermen

Aanraakgevoelige touchscreens worden toegepast in fitnessapparaten, geldautomaten, kaartjesautomaten op stations, navigatiesystemen, koffiemachines en natuurlijk telefoons en tablets. Je kunt ze met je vingers bedienen, maar bijvoorbeeld niet met je nagel of de achterkant van een pen. Ze werken ook niet als je gewone handschoenen draagt. Deze schermen reageren op geleidende materialen en worden ook wel 'capacitieve schermen' genoemd (figuur 1). Bij deze schermen hoef je niet hard te drukken, aanraking met een geleider is genoeg. Dat doet iets met de elektrische spanning op het scherm. Je maakt op dat punt 'contact met aarde', dat wil zeggen dat het punt dat je aanraakt '0 volt' wordt. De vier hoekpunten van het scherm zijn meetpunten, daar neemt de lading af in relatie tot de afstand tot het punt van aanraking. Zo herkent het systeem welk punt van het scherm is aangeraakt.

Zuid-Koreanen swipen in de kou met worstjes.

Er bestaan ook touchscreens die je wel kunt bedienen met isolerende voorwerpen. Vaak zijn dat schermen waarop je ook kunt schrijven, niet alleen dingen aanklikken. Bekende voorbeelden zijn smartboards op scholen en de apparaten waarop je met een speciaal pennetje een handtekening zet als je een pakket in ontvangst neemt van een bezorger. Deze touchscreens zijn drukgevoelig en worden 'resistieve schermen' genoemd (figuur 2).

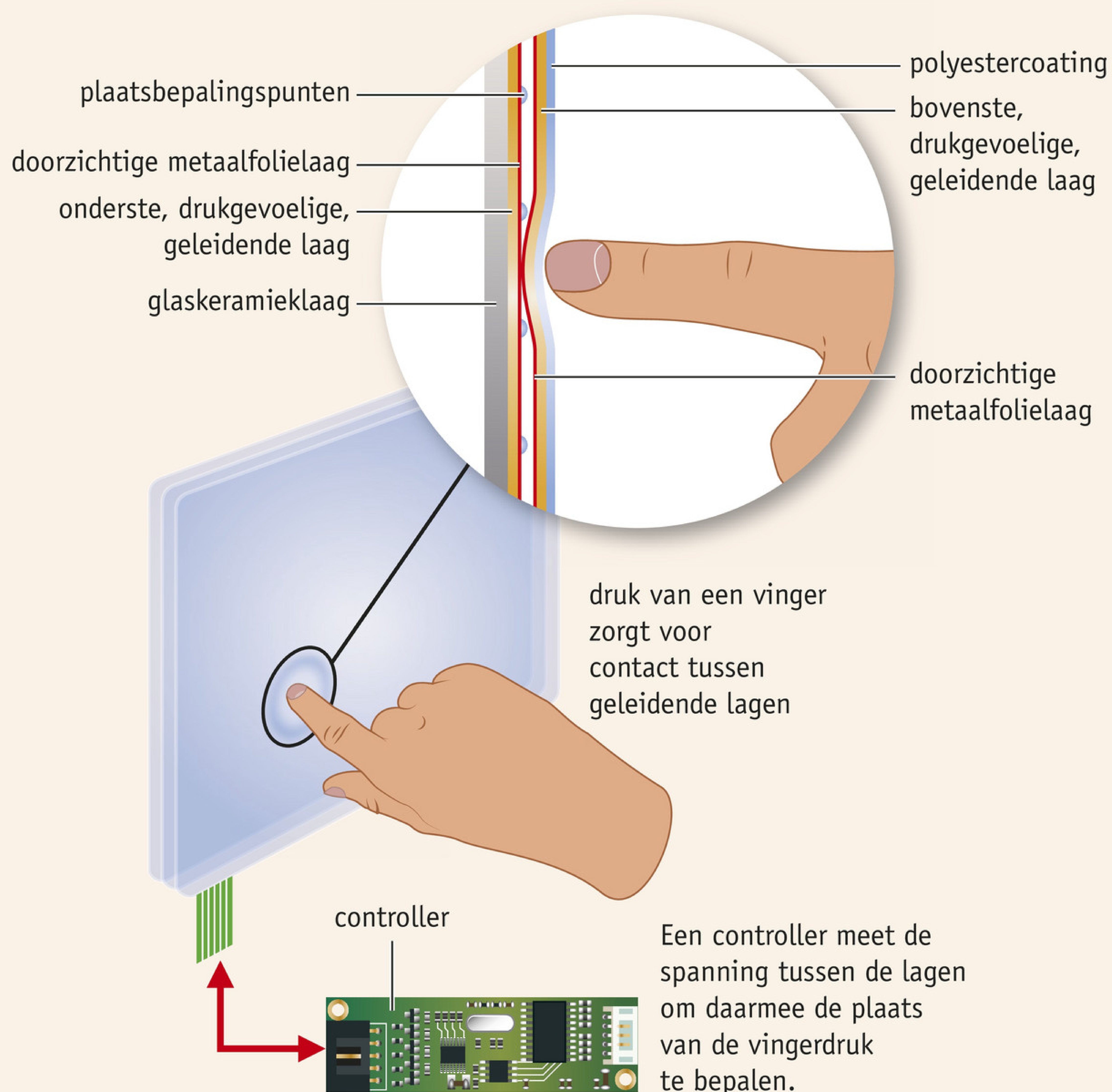


▲ **figuur 1** capacitief touchscreen

De werking van die schermen berust ook op elektrische geleiding: twee geleidende lagen worden op een bepaald punt tegen elkaar gedrukt. Daarvoor is enige kracht nodig. Deze schermen hebben geen mogelijkheid voor 'multitouch': je kunt bijvoorbeeld niet met meerdere vingers iets uitvergroten.

Oplossingen voor in de kou

Gewone handschoenen geleiden niet goed genoeg voor standaard capacitieve touchscreens. Je kunt natuurlijk de vingertoppen van een handschoen afknippen, maar verschillende bedrijven hebben betere oplossingen bedacht. Handschoenen kunnen op verschillende manieren beter geleidend worden gemaakt.
De eerste oplossing was geleidende stukjes materiaal op de vingertoppen. Ook kan een vloeistof met geleidende deeltjes op gewone handschoenen worden gedruppeld. Later zijn er stoffen toegepast met geleidende draden erin. Ten slotte kunnen in leren handschoenen piepkleine zilverdeeltjes, zogenaamde nanodeeltjes, worden verwerkt, waardoor de hele handschoen geleidt.
Daarnaast is er de mogelijkheid de touchscreens zelf gevoeliger te maken. De geleidbaarheid van gewone handschoenen is laag, maar niet nul. Wat als de schermpjes reageren op minder goede geleiders? Het nadeel is dat deze schermen dan op van alles reageren, ook op geleiders die in de buurt zijn. De software van het apparaat moet dan het echte signaal van de ruis onderscheiden. Dat werkt nog niet zo goed.
Websites die tientallen merken touchscreenhandschoenen vergelijken, nemen het druppelen met geleidende deeltjes niet zo serieus. Het is onhandig om handschoenen steeds nat te maken. Ook geleidende stukjes materiaal op de vingertoppen zijn uit



▲ **figuur 2** resistief touchscreen

de gratie geraakt. De metalen rondjes op de vingers raken los en gebruikers vinden de uitstraling ervan erg technisch en niet prettig.
De oplossing met geleidende draden wordt in veel modellen handschoen toegepast. De draden die de stof geleidend maken zijn nylondraden met een laagje zilver of koper erop. Geleidende draden worden bijvoorbeeld ook toegepast in antistatische vloerbedekking. Ze zorgen ervoor dat iemand die loopt niet wordt opgeladen met statische elektriciteit door de wrijving tussen kunststof en schoenzool. De lading kan voortdurend wegstromen.

Ontwerpeisen

De ontwerpafdeling van elk bedrijf begint bij het ontwerpproces met wensen van de klant. Voor telefoonfabrikanten is het bijvoorbeeld belangrijk om te weten dat smartphonegebruikers willen dat het scherm niet snel breekt als ze hun telefoon laten vallen. Een andere wens is om als het koud is met handschoenen aan een touchscreen te kunnen bedienen. Deze wens wordt door bijvoorbeeld een kledingfabrikant omgezet in een programma van eisen. Daarin staat dat schermen moeten reageren op de handschoenen. Maar dat is niet het enige. De handschoen moet ook warm genoeg zijn en een goede grip hebben, zodat je je telefoon niet laat vallen. Verder moet deze goed zitten bij de bediening van touchscreens en geen krassen maken. De doelgroep moet de handschoenen ook mooi vinden en ze moeten goedkoop, milieuvriendelijk, en zonder kinderarbeid kunnen worden geproduceerd. Met dit programma van eisen zie je meteen dat handschoenen die geheel van aluminium of een ander metaal zijn gemaakt niet handig zijn. Die zouden elektriciteit supergoed geleiden, maar warmte ook, zodat ze niet helpen tegen de kou. De stof van de handschoen moet dik genoeg zijn om je handen warm te houden, maar niet zo dik dat je niet meer nauwkeurig kunt klikken. Wat de beste handschoenen zijn, hangt ook af van de gemiddelde temperatuur in het gebied waar je woont. Verder is het een kwestie van smaak en stijl. Ook de prijs speelt een rol: er zijn dure merkhandschoenen zoals Burberry's van tegen de vierhonderd euro, maar ook handschoenen die slechts drie euro kosten en ook goed functioneren.

Glaskeramiek

Bij het kopen van een smartphone is de kwaliteit van de weergave op het scherm vaak de belangrijkste eigenschap. Het scherm van je smartphone toont je alle functies. Als je ooit je smartphone hebt laten vallen zonder dat er beschadiging van het scherm optrad, was je waarschijnlijk opgelucht (figuur 3). Smartphoneschermen zijn van een bijzonder hard materiaal gemaakt.



▲ **figuur 3** Dit wil je niet!

Commercieel vooruitdenken

De bedenkers van handschoenen voor touchscreens zijn niet zo rijk geworden als de bedenkers van de smartphone. Maar ze zagen wel commerciële mogelijkheden in de toen nieuwe technologie. Misschien is dat de kunst: als je niet de bedenker van de zelfrijdende auto bent, bedenk je misschien wel de zelfrijdende scootmobiel. Als je niet de eerste quantumcomputer maakt, programmeer je misschien wel het eerste quantumcomputerspel.
Ook op het gebied van handschoenen kun je denken over verdere mogelijkheden. Chirurgen dragen ook handschoenen. Tijdens een operatie willen ze resultaten van medische scans op een scherm toveren, waarbij het scherm steriel moet blijven. Wie ontwikkelt optimale handschoenen voor dit doel?
Op het gebied van nieuwe schermen wordt gewerkt aan materialen die van een klein afstandje al 'voelen' dat je vinger ernaar wijst. Bepaalde kristallen zwellen op door het vocht dat verdampt van je vinger, waardoor de geleiding beter wordt. Dat heeft zo zijn voordelen. Zo'n 'no-touchscreen' is hygiënischer dan een scherm waar iedereen maar met zijn vingers aan zit!

Opdrachten

Bestudeer eerst de theorie van dit hoofdstuk voordat je de volgende opdrachten uitvoert.

1 Draden
Garen kan een diameter hebben van 0,30 mm.
- **a** Bereken de weerstand van een 10 cm lange nylondraad met deze diameter.
- **b** Bereken de weerstand van een 10 cm lange zilverdraad met deze diameter.
- **c** Leg uit waarom handschoenen met geleidende draden regelmatig een wasbeurt nodig hebben.

Op een nylondraad met een diameter van 0,30 mm wordt een laagje zilver van 2,0 μm aangebracht.
- **d** Bereken de weerstand van 10 cm van deze draad.

2 Ontwerpeisen
Bij elektrische voertuigen die op rails rijden, is er een stroomkring van de bovenleiding, door de motor, naar de rails. Soms werken er twee treinen op één spanningsbron.
- **a** Noteer vier eisen waaraan het materiaal van de bovenleiding van een tram of trein moet voldoen.
- **b** Teken het schakelschema met één spanningsbron en twee vertrekkende treinen.
- **c** Geef in je schema aan op welk punt de draad van de bovenleiding heet kan worden.
- **d** Bedenk drie oplossingen om deze oververhitting te voorkomen.

3 Willem Einthoven
Willem Einthoven was een Nederlandse arts en onderzoeker. In 1924 kreeg hij de Nobelprijs voor Fysiologie of Geneeskunde omdat hij een slim meetinstrument had ontworpen voor onderzoek naar het hart. Hij wist dat het hart elektrische spanningspulsjes maakt en dat die aan de buitenkant van het lichaam ook leiden tot kleine elektrische spanningen. Die zijn echter in de orde van millivolts. Bovendien variëren de spanningen snel. De metingen die daaraan in zijn tijd konden worden gedaan, waren zeer onnauwkeurig.
Einthovens nieuwe ‘cardiograaf’ was veel nauwkeuriger. Wat hij nodig had, was een heel dun en flexibel geleidend draadje. Als daar stroompjes door lopen en je houdt het draadje in een magneetveld, dan wordt er een kracht op uitgeoefend die afhangt van de grootte van de stroom. Daardoor voert het draadje een beweging uit die met behulp van een microscoop zichtbaar is te maken.
Einthoven had een slimme manier bedacht om flexibele geleidende draadjes te maken. Hij bevestigde een druppel vloeibaar glas aan een pijl. Door de pijl met een boog weg te schieten, kreeg hij een lange glasdraad van 2 μm dik. Daar nam hij een klein stukje van en daar dampte hij een laagje zilver of goud op.
- **a** Leg uit waarom Einthoven als geleidende materialen voor zilver en goud koos.
- **b** Noem twee ontwerpeisen waaraan het draadje van Einthoven moest voldoen.

Ga ervan uit dat het laagje zilver op een glasdraadje 0,5 μm dik is. De diameter van de glaskern is 2 μm.
- **c** Bereken de massa van een stukje draad van 2,5 cm lengte.
- **d** Bereken de weerstand van deze zilverdraad met niet-geleidende glaskern.
- **e** Bereken de grootte van de stroompjes die door de draad lopen als de grootte van de spanningen rond 1 mV ligt.

Door een dikker draadje loopt bij dezelfde spanning een grotere stroom. De kracht die de draad ondervindt in een magneetveld is dan ook groter. Toch is het beter een zo dun mogelijk draadje te gebruiken.
- **f** Leg uit welk voordeel zo’n heel dun draadje heeft voor het nauwkeurig vastleggen van spanningen die het hart veroorzaakt op de huid.

Bij het in ontvangst nemen van de Nobelprijs zei Einthoven dat hij meestal werkte met draden van een paar micrometer dik, maar dat hij ook een draadje van 0,2 μm dik en 18 mm lengte kon maken met een weerstand van $2{,}5 \cdot 10^4$ Ω.
- **g** Ga met een berekening na of dit een draadje van zuiver goud is of dat ook hier een glaskern in zit.

4 Isolerende handschoenen
Professionals die werken met elektriciteit moeten speciale handschoenen dragen voor de veiligheid bij het werken met hoge spanningen.
Zoek informatie over de gebruikte materialen en de dikte van de stof die vereist is voor verschillende toepassingen. Beschrijf je bevindingen.

1 Elektrisch vermogen

In deze paragraaf leer je:

- redeneren met de grootheden lading, stroomsterkte, spanning, energie, vermogen en rendement;
- berekeningen uitvoeren met stroomsterkte, lading en tijd;
- berekeningen uitvoeren met spanning, energie en lading;
- berekenen uitvoeren met rendement.

In Nederland heeft het lichtnet een spanning van 230 V. Zodra je een apparaat aanzet, bijvoorbeeld een waterkoker, gaat er een stroom doorheen lopen en wordt elektrische energie omgezet. Op het typeplaatje van het apparaat kun je aflezen voor welke spanning het apparaat is ontworpen (figuur 1). Hierop zie je ook de grootte van het vermogen.

Stroomsterkte

Een stroomkring kun je vergelijken met een rivier. In de Rijn stroomt een hoeveelheid water in één seconde langs een bepaald punt. Elektrische **stroomsterkte** geeft aan hoeveel elektrische lading per seconde langs een punt van een stroomkring stroomt. De definitie is:

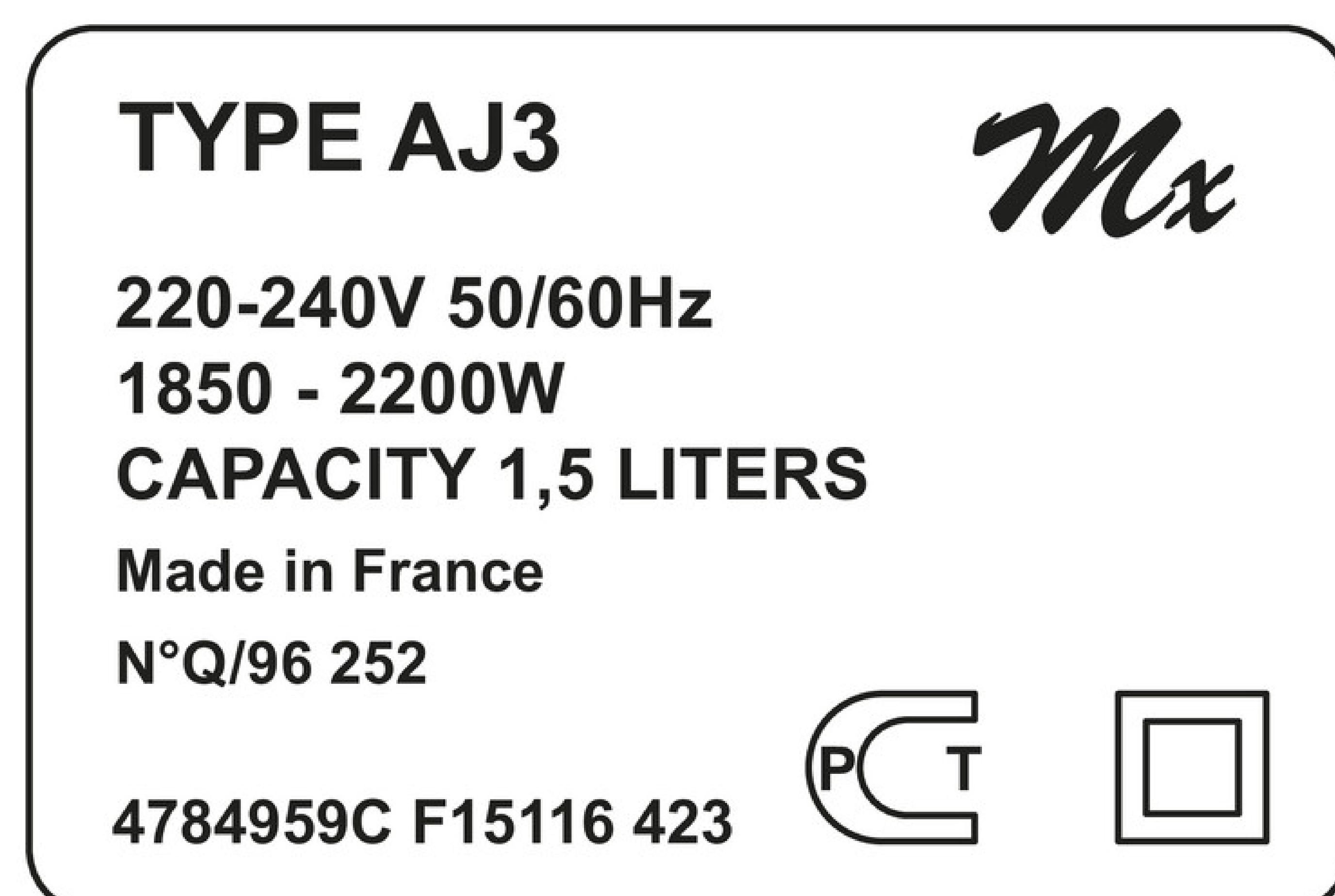
$$I = \frac{Q}{t}$$

Hierin is:

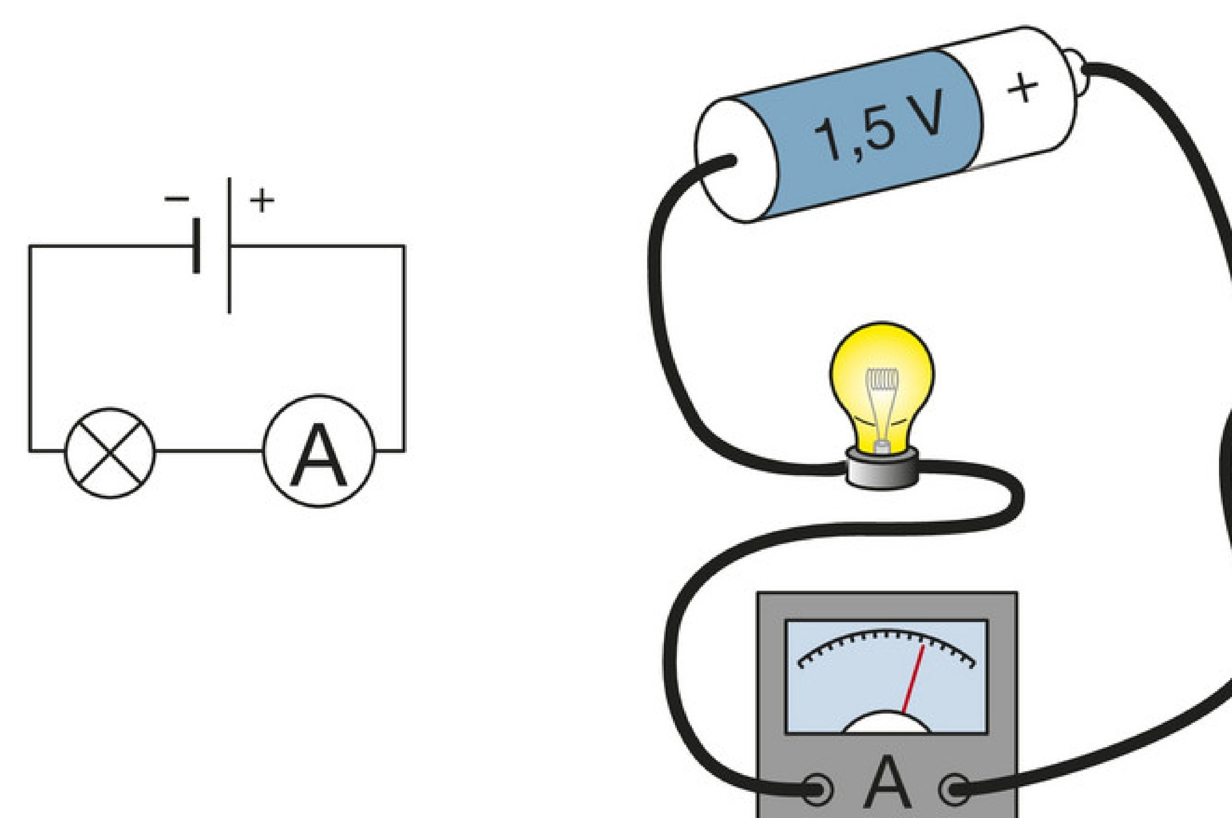
- I de stroomsterkte in ampère (A);
- Q de lading in coulomb (C);
- t de tijd waarin de lading Q voorbijkomt in seconde (s).

Een stroommeter (ook wel ampèremeter genoemd) moet je in de stroomkring plaatsen zoals aangegeven in figuur 2. De stroom door het lampje gaat ook in zijn geheel door de stroommeter.

In een stroomkring stromen elektronen. Elk elektron heeft eenzelfde, negatieve lading, in grootte gelijk aan het **elementair ladingsquantum** e. Voor de lading van kleine deeltjes wordt vaak de kleine letter q als symbool gebruikt, dus schrijf je $q_e = -e = -1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C. Een nauwkeuriger waarde voor e vind je in Binas tabel 7A.



▲ **figuur 1** typeplaatje van een waterkoker



▲ **figuur 2** elektrische stroom meten

Elektrische energie en spanning

Een lading kan elektrische energie hebben. De elektrische energie van een lading kun je vergelijken met de zwaarte-energie van een massa, bijvoorbeeld van water in een hooggelegen stuwmeer. In hoofdstuk 3 heb je geleerd dat bij het naar beneden gaan van massa zwaarte-energie wordt omgezet in kinetische energie. Als er een weerstandskracht is, wordt de kinetische energie vervolgens omgezet in warmte. Je kunt met naar beneden gaande massa ook andere dingen in beweging zetten. Denk maar aan een stuwmeer met een waterkrachtcentrale (figuur 3). Het vallende water geeft energie af aan een turbine.



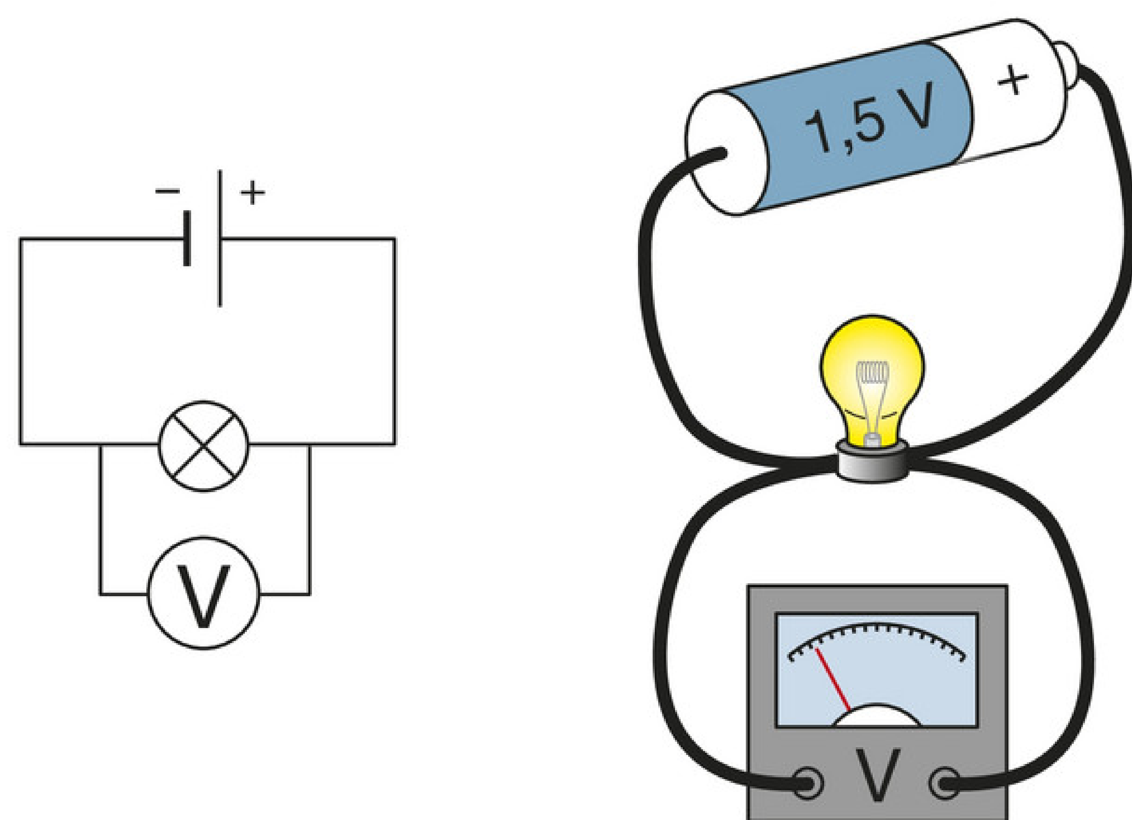
▲ **figuur 3** stuwmeer met waterkrachtcentrale

Met elektriciteit werkt het net zo. Ladingen krijgen elektrische energie door een spanningsbron in een stroomkring. Ze gaan daardoor bewegen en geven energie af aan het materiaal van de stroomkring, bijvoorbeeld een gloeidraad in een lamp. In dat geval wordt de elektrische energie van de elektronen omgezet in licht en warmte.
Als je de polen van een spanningsbron direct met elkaar verbindt, gaat er een grote stroom lopen, omdat deze 'stroomkring' vrijwel geen weerstand heeft. Dit heet **kortsluiting**. Alle elektrische energie van de ladingen wordt in de stroomdraad omgezet in warmte. De stroomdraad is daar niet op berekend en kan doorbranden.
Elektrische energie is een vorm van potentiële energie: dat is de verzamelnaam voor energiesoorten die van de positie van voorwerpen afhangen. Zoals de zwaarte-energie van een massa afhangt van de hoogte boven de aarde, zo hangt de elektrische energie van een lading af van de positie ten opzichte van de polen van een spanningsbron. De elektrische energie hangt ook af van de grootte van de lading. Als je het energieverschil tussen twee punten *per coulomb lading* berekent, heb je een eigenschap van de stroomkring zelf, onafhankelijk van welke lading je bekijkt: de **spanning** tussen twee punten. De formule is:

$$U = \frac{\Delta E}{Q}$$

Hierin is:
- U de spanning in volt (V);
- ΔE het verschil in elektrische energie tussen twee punten in joule (J);
- Q de lading in coulomb (C).

De spanning U geeft aan hoe groot de 'druk' is die op elektronen wordt uitgeoefend om van de minpool in de richting van de pluspool te bewegen. De materialen bij beide polen spelen daarbij een rol.
Een lithium-mangaandioxidebatterij heeft een andere spanning dan een zink-koolstofbatterij. Als je wisselspanning opwekt met een dynamo hangt de grootte van de spanning onder andere af van het tempo waarmee de dynamo draait.
Spanning meet je met een spanningsmeter (ook wel voltmeter genoemd). Omdat spanning een verschil in elektrische energie tussen twee punten aangeeft, sluit je een spanningsmeter aan *over* een elektrische component, bijvoorbeeld parallel aan een lampje (figuur 4).



▲ **figuur 4** elektrische spanning meten

Elektrisch vermogen

Stroomsterkte geeft aan hoeveel lading per seconde langs een punt in een stroomkring stroomt. Spanning geeft aan hoeveel energie een lading tussen twee punten in de stroomkring afgeeft. Als je de spanning en de stroomsterkte weet, kun je berekenen hoeveel energie de ladingen per seconde afstaan.

Voorbeeldopgave 1

Over een lampje staat een spanning van 6,0 V. Er gaat een stroom door het lampje van 0,50 A. Bereken de energie die de ladingen in 1,0 s afgeven.

Uitwerking
Een stroomsterkte van 0,50 A betekent dat er per seconde 0,50 C aan lading door het lampje stroomt. Een spanning van 6,0 V betekent dat elke coulomb lading een energie afgeeft van 6,0 J. De lading van 0,50 C staat dan per seconde 3,0 J af.

De berekening uit voorbeeldopgave 1 is ook in een formule te schrijven:

$$\frac{\Delta E}{t} = \frac{\Delta E}{Q} \cdot \frac{Q}{t} = U \cdot I$$

De elektrische energie die per seconde door een spanningsbron aan een elektrische component wordt afgestaan, is het **elektrisch vermogen**:

$$P = U \cdot I$$

Hierin is:
- P het vermogen in watt (W);
- U de spanning in volt (V);
- I de stroomsterkte in ampère (A).

Rendement

In hoofdstuk 3 heb je twee formules geleerd voor rendement die ook hier geldig zijn:

$$\eta = \frac{E_{nuttig}}{E_{in}} \cdot 100\% = \frac{P_{nuttig}}{P_{in}} \cdot 100\%$$

Voorbeeldopgave 2

Een elektrische lift tilt een massa van 100 kg over een hoogte van 2,5 m. De lift werkt op het lichtnet en heeft een vermogen van 650 W. Het tillen duurt 5,0 s.

a Bereken de stroomsterkte.
b Bereken het rendement van deze lift.

Uitwerking

a Formule: $I = \frac{P}{U}$
Gegevens:
$P = 650$ W
$U = 230$ V

$$I = \frac{650}{230} = 2{,}83 \text{ A}$$

b De arbeid is gelijk aan $W = F_z \cdot s = (100 \times 9{,}81) \times 2{,}5 = 2{,}45 \cdot 10^3$ J. Dit is de nuttig toegepaste energie. Er zijn vervolgens twee uitwerkingen mogelijk, waarbij je in beide gevallen ook het gegeven $t = 5{,}0$ s gebruikt.

I Het nuttig vermogen is:

$$P_{nuttig} = \frac{E_{nuttig}}{t} = \frac{2{,}45 \cdot 10^3}{5{,}0} = 491 \text{ W}$$

Het rendement is dus:

$$\eta = \frac{P_{nuttig}}{P_{in}} \cdot 100\% = \frac{491}{650} \times 100\% = 75\%$$

II De toegevoerde energie is gelijk aan: $E_{in} = P_{in} \cdot t = 650 \times 5{,}0 = 3250 \text{ J} = 3{,}25 \text{ kJ}$

Het rendement is dan: $\eta = \frac{E_{nuttig}}{E_{in}} \cdot 100\% = \frac{2{,}45}{3{,}25} \times 100\% = 75\%$

Bij grote getallen is het handig om niet de eenheid joule te gebruiken, maar de eenheid kilowattuur (kWh). Dit moet je lezen als kilowatt *keer* uur. Omdat het energieverbruik in de industrie vaak heel groot is, worden daar ook wel MWh en GWh gebruikt. De kWh is een maat die meestal wordt gebruikt voor *elektrische* energie. Je kunt deze echter ook voor andere energiesoorten gebruiken, zoals voor mechanische energie. Let er bij berekeningen met rendement op dat je voor de energie die nuttig wordt verbruikt dezelfde eenheid neemt als voor de energie die wordt toegevoerd. Beide energieën kun je dus uitdrukken in joule, maar ook in kilowattuur. Hetzelfde geldt voor de vermogens: de eenheid moet hetzelfde zijn.

Onthoud!

- Elektrische stroomsterkte is de lading die per tijdseenheid langs een punt in een stroomkring stroomt: $I = \dfrac{Q}{t}$
- Elektrische spanning is het energieverschil tussen twee punten in een stroomkring, gerekend per lading: $U = \dfrac{\Delta E}{Q}$
- Het vermogen is de elektrische energie die per seconde wordt omgezet in een andere energievorm. Je kunt het elektrisch vermogen berekenen met: $P = U \cdot I$
- De elektrische energie bereken je met $E = P \cdot t$. Als je SI-eenheden invult, dan is dit de elektrische energie in joule.
- Elektrische energie kun je ook uitdrukken in de eenheid kilowattuur. Dezelfde formule $E = P \cdot t$ geldt dan, maar je drukt vermogen uit in kilowatt en tijd in uur.

Opdrachten

1 Meetapparatuur
Een stroommeter wordt ook wel ampèremeter genoemd.
a Waarom is de term stroommeter beter dan ampèremeter?
b Leg met behulp van de definitie voor stroomsterkte uit waarom een stroommeter in de stroomkring in serie met een component wordt opgenomen en er niet parallel aan wordt geschakeld.
c Leg met behulp van de definitie voor spanning uit waarom een spanningsmeter parallel aan een component wordt aangesloten.

2 Batterij
Je hebt een batterij van 9 V.
a Bereken hoeveel elektrische energie een elektron meer heeft bij de negatieve pool van deze batterij dan bij de positieve pool.

De batterij wordt aangesloten op een stroomkring. Er loopt een stroom van 0,25 A.
b Bereken hoeveel elektronen per seconde door de stroomkring gaan.
c Bereken het vermogen dat de batterij levert.

3 Analogie met water
In deze paragraaf is stroom door een stroomdraad vergeleken met een stromende rivier. Kies in de volgende twee vergelijkingen de juiste grootheid.
a Als je water een groter hoogteverschil laat overbruggen, kun je dat vergelijken met een grotere stroom/spanning.
b Als er door smeltend ijs in de bergen meer water door dezelfde rivier stroomt, kun je dat vergelijken met een grotere stroom/spanning.

4 Broodrooster
Een broodrooster heeft een vermogen van 900 W.
a Bereken de stroomsterkte door het broodrooster.

Het roosteren van een boterham duurt 2,0 min.

b Bereken de lading die in deze tijd door het broodrooster stroomt.

c Bereken de afgegeven energie tweemaal: met de formule voor energie, vermogen en tijd, en ook met de formule voor energie, spanning en lading. Controleer of je tweemaal hetzelfde antwoord krijgt.

5 Koelkast

Het gemiddelde vermogen van een zuinige koelkast is 12 W, het piekvermogen is 130 W.

a Leg uit waarom het piekvermogen veel hoger is dan het gemiddelde vermogen.

b Bereken het energieverbruik van de koelkast in een jaar, uitgedrukt in kilowattuur.

Het vermogen van een stofzuiger is 1,8 kW.

c Leg uit of hier piekvermogen of gemiddeld vermogen wordt bedoeld.

d Bereken het energieverbruik van de stofzuiger in een jaar, uitgedrukt in kWh. Schat hiertoe hoelang een stofzuiger in een jaar aanstaat.

e Welk apparaat is duurder in het gebruik, de koelkast of de stofzuiger?

6 Oplaadbare batterij

Op een oplaadbare batterij staat ‘1,2 V’ en ‘2000 mAh’.

a Bereken hoeveel energie er in de batterij is opgeslagen. Druk dit uit in kilowattuur.

Je laadt de batterij op met een oplader. De stroom die gaat lopen is 200 mA bij een spanning van 1,2 V.

b Bereken hoelang het duurt voordat de batterij is opgeladen als je aanneemt dat er geen elektrische energie verloren gaat.

In werkelijkheid duurt het zestien uur voor de batterij is opgeladen.

c Bereken het rendement waarmee de batterij wordt opgeladen.

7 Formule afleiden

Ga uit van de formule voor rendement uitgedrukt in energie. Laat met behulp van het verband tussen energie en vermogen zien dat je het rendement ook kunt berekenen met het vermogen.

8 Spaarlamp

Een spaarlamp van 12 W zet 45% van de elektrische energie om in zichtbaar licht.

a Bereken hoeveel energie er per seconde wordt omgezet in warmte.

In de winter gebruik je deze lamp om warm te blijven.

b Beredeneer hoe groot het rendement van de lamp is als warmtebron.

Je wilt in de winter ook een boek lezen bij de lamp.

c Beredeneer hoe groot nu het rendement van de lamp is.

d Leg uit hoe het kan dat je in deze opdracht drie verschillende waarden voor het rendement hebt gevonden.

9 Gloeivinger?

Als je een touchscreen aanraakt, is je vinger een geleidende verbinding tussen scherm en aarde.

Leg aan de hand van een formule uit dat het scherm slechts een heel klein vermogen aan de vinger levert.

+10 Bliksem

De stroomsterkte van een bliksemflits is 30 kA. Bij de ontlading stroomt er in totaal 15 C elektrische lading.

a Bereken hoelang de ontlading duurt.

Bij de ontlading komt 500 MJ energie vrij.

b Bereken de spanning tussen de onweerswolk en de grond.

c Bereken het vermogen van een bliksemflits.

d Bereken hoe groot de stroomsterkte uit een stopcontact zou zijn als het vermogen even groot was als bij een bliksemflits.

2 Weerstand en geleidbaarheid

In deze paragraaf leer je:

- redeneren met de grootheden weerstand en geleidbaarheid;
- berekeningen uitvoeren met stroom, spanning, weerstand en geleidbaarheid.

Een wasmachine en een leeslampje worden aangesloten op dezelfde spanning. De gevolgen zijn heel verschillend. Een wasmachine heeft een veel groter vermogen en zet op sommige momenten wel honderd keer zoveel energie om als het lampje. In de vorige paragraaf leerde je dat bij een groter vermogen een grotere stroomsterkte hoort. De weerstand van het apparaat speelt daarbij een rol.

Definitie van weerstand en geleidbaarheid

Het water in een stuwmeer heeft zwaarte-energie en zal naar beneden stromen als daar de mogelijkheid voor is. De mate waarin dat gebeurt, wordt bepaald door hoe ver de kleppen in de dam openstaan. De beheerder zet de kleppen verder open als de turbines harder moeten draaien. Hoe verder ze openstaan, hoe meer water er per seconde gaat stromen.
Zo werkt het ook in elektrische systemen. De **weerstand** is een grootheid die aangeeft hoeveel stroom er gaat lopen bij een bepaalde spanning. Hoe kleiner de weerstand, hoe groter de stroomsterkte. De definitie van de weerstand van een apparaat of van een draad luidt:

$$R = \frac{U}{I}$$

Hierin is:

- R de elektrische weerstand in ohm (Ω);
- U de elektrische spanning in volt (V);
- I de elektrische stroomsterkte in ampère (A).

R is de afkorting van het Engelse woord *resistance*. Uit de definitie van de weerstand volgt automatisch dat de bijbehorende eenheid gelijk is aan de eenheid van spanning gedeeld door de eenheid van stroomsterkte: $[R] = \frac{[U]}{[I]} = \frac{\text{V}}{\text{A}} = \Omega$

In veel toepassingen ligt de spanning vast, bijvoorbeeld omdat een apparaat werkt op het lichtnet. Je gebruikt de formule daarom vaak om uit te rekenen wat de stroomsterkte wordt.

De geschikte vorm is dan: $I = \frac{U}{R}$

Soms wordt het omgekeerde van weerstand gebruikt. Dat is de **geleidbaarheid** G. Er geldt:

$$G = \frac{I}{U}$$

Je ziet dat $G = \frac{1}{R}$. Deze grootheid bevat dezelfde informatie over een draad of een apparaat als de weerstand, maar soms is het handig om te kunnen schrijven $I = G \cdot U$ in plaats van $I = \frac{U}{R}$. De eenheid van geleidbaarheid is de siemens (S): 1 S = 1 Ω^{-1}.

Van veel huishoudelijke apparaten is het vermogen gegeven. P en U zijn dus bekend. Door de verbanden $P = U \cdot I$ en $U = I \cdot R$ te combineren, kun je de weerstand van het apparaat berekenen.

Voorbeeldopgave 3

De stroom in een strijkijzer loopt via de draad van de ene stekkerpen in het stopcontact naar een verwarmingselement, door het verwarmingselement, en door een draad terug naar de andere stekkerpen in het stopcontact. Een strijkijzer heeft een vermogen van 1800 W. Bereken de gezamenlijke weerstand van de draden en het verwarmingselement.

Uitwerking
Je hebt twee formules nodig. Eerst bereken je met $I = \frac{P}{U}$ de stroomsterkte door het strijkijzer.

Daarna bereken je met $R = \frac{U}{I}$ de weerstand.

Gegeven zijn P en U, want P staat in de opgave en je weet dat een strijkijzer werkt op 230 V.

Invullen: $I = \frac{P}{U} = \frac{1800}{230} = 7{,}83$ A

$R = \frac{U}{I} = \frac{230}{7{,}83} = 29{,}4\ \Omega$

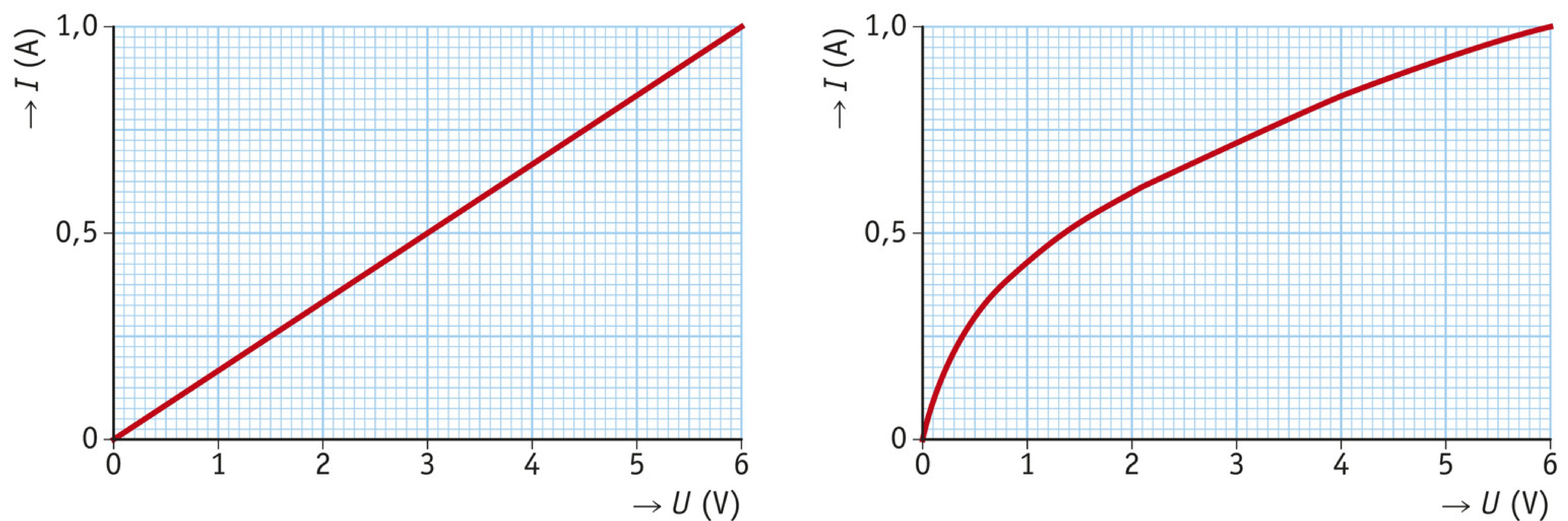
▶ **EXPERIMENT 1** De weerstand van niet-aangesloten apparaten (begripspracticum)

De wet van Ohm

Bij veel weerstandsdraden in apparaten is de weerstand niet constant, het verband tussen U en I is niet recht evenredig. De oorzaak is dat de draad warm wordt bij een groter vermogen, als er meer energie per seconde wordt omgezet. Dit heeft invloed op de grootte van de weerstand. Meestal wordt bij een hogere temperatuur de weerstand groter. Dat betekent dat als de spanning bijvoorbeeld 10× zo groot wordt, de stroomsterkte *minder* dan 10× zo groot wordt.

Het verband $I = \frac{U}{R}$ is *altijd* geldig, maar je werkt met de op dat moment geldende I, U en R.

Een **ohmse weerstand** is een speciaal geval: daarbij is de weerstandswaarde R constant. Dat betekent dat de stroom die gaat lopen recht evenredig is met de aangelegde spanning. De grafiek van I tegen U is dus een rechte lijn door de oorsprong. Je zegt dan: “Deze weerstand voldoet aan de **wet van Ohm**.” In figuur 5 zie je de (I,U)-diagrammen van een ohmse en een niet-ohmse weerstand.



▲ **figuur 5** (I,U)-diagrammen van een ohmse weerstand (links) en een niet-ohmse weerstand (rechts)

Voorbeeldopgave 4

Je meet de weerstand van een niet-aangesloten gloeilamp van 40 W die in de fitting van een lamp is gedraaid. Je doet dit door de polen van een multimeter te verbinden met de beide pennen van de stekker die aan de lamp vastzit. Je meet een weerstand van 108 Ω. Beredeneer of de gloeidraad voldoet aan de wet van Ohm.

Uitwerking
Op de manier van voorbeeldopgave 3 bereken je dat de weerstand gelijk is aan 1,3 kΩ als de gloeilamp van 40 W aanstaat. Kennelijk is de weerstand van de gloeidraad veel hoger als hij heet is dan als hij koud is. De weerstand heeft geen constante waarde, de gloeidraad voldoet dus niet aan de wet van Ohm.

Apparaten in huis werken op een spanning van 230 V. Door een apparaat met een groot vermogen loopt een grote stroom. De weerstand is dus klein en de geleidbaarheid groot. In een auto werkt alles op 12 V. Autolampen hebben in vergelijking met lampen in huis voor dezelfde hoeveelheid licht een veel grotere stroom nodig. Een veel grotere stroom bij een kleinere spanning vereist een veel kleinere weerstand van de lamp.

Onthoud!

- Elektrische weerstand in ohm (Ω) geeft aan hoeveel stroom er gaat lopen bij een bepaalde spanning: $R = \dfrac{U}{I}$
- De geleidbaarheid is het omgekeerde van de weerstand: $G = \dfrac{I}{U}$. De eenheid van geleidbaarheid is de siemens (S).
- Als de weerstand van een apparaat of een draad constant is, dan voldoet deze weerstand aan de wet van Ohm. Die weerstand noem je dan een ohmse weerstand.
- Veel weerstanden voldoen niet aan de wet van Ohm, vaak wordt de weerstand groter als de stroom groter wordt. Dit komt doordat dan ook de temperatuur stijgt.
- Door de verbanden $P = U \cdot I$ en $U = I \cdot R$ te combineren, kun je conclusies trekken over de weerstand van een apparaat.

Opdrachten

11 Andere stromen
Als een aanvoerbuis van de waterleiding is gesprongen, loopt er per seconde een grote hoeveelheid water je huis in.
a Leg uit met welk elektrisch verschijnsel je dit kunt vergelijken.

Als een weg is afgesloten, loopt er helemaal geen verkeersstroom.
b Leg uit met welke situatie dit overeenkomt in het geval van een elektrisch circuit.

12 Apparaten
Apparaten hebben een bepaalde weerstand.
a Leg uit welk apparaat als geheel een grotere weerstand heeft: een vaatwasmachine of een koffiezetapparaat.
b Leg uit welk van de twee apparaten de grootste geleidbaarheid heeft.

13 Goede geleiders
Zet de volgende draden op volgorde van kleine naar grote geleidbaarheid.
I G = 2,0 kS
II R = 2,0 kΩ
III R = 2,0 mΩ
IV G = 2,0 MS
V Bij U = 200 V stroomt er I = 200 mA.

14 Weerstand
In een auto werken de elektrische systemen op een accu die 12 V levert. Vergelijk een koplamp met vermogen 60 W met een lamp in huis met hetzelfde vermogen.
a Leg uit welke lamp de grootste weerstand heeft.
b Bereken de verhouding van de weerstanden van beide lampen.

15 Lampje
Je hebt een batterij van 4,5 V. Je sluit er een lampje op aan dat hoort te werken op een spanning van 4,5 V en dat dan een vermogen van 6,0 W heeft.
a Bereken de weerstand van het lampje.

De batterij raakt leeg en je hebt alleen een andere batterij van 1,5 V.
b Bereken het vermogen dat deze batterij levert als je deze aansluit op het lampje. Ga ervan uit dat de weerstand gelijk blijft.
c Leg uit hoe het komt dat het vermogen nu méér dan 3× zo klein is als bij een spanning van 4,5 V.

16 Ohms of niet ohms
In een broodrooster zit een gloeidraad. Als je hem aansluit op het lichtnet, is het vermogen 1,0 kW. Als je hetzelfde broodrooster aansluit in de Verenigde Staten, waar de spanning van het lichtnet 115 V is, dan is het vermogen 0,40 kW.
Leg met behulp van getallen uit dat uit deze gegevens volgt dat de gloeidraad geen ohmse weerstand is.

17 Ontlading
De polen van een batterij van 4,5 V raken een stukje staalwol waardoor de weerstand tussen de polen gelijk is aan 0,1 Ω.
a Bereken het vermogen van de batterij.
b Leg uit dat de batterij op deze manier snel leeg zal raken.

Op de batterij staat '1800 mAh'. Dat betekent dat deze bijvoorbeeld 1 h lang 1800 mA kan leveren, of 10 h lang 180 mA.

c Bereken hoelang het duurt voor de batterij leeg is als deze de staalwol raakt.

18 Stroomsterkte

Orden de onderstaande situaties van kleine naar grote stroomsterkte.

I Een lading van 1,0 nC passeert in 2,0 ms.

II Een draad met een geleidbaarheid van 0,60 μS wordt aangesloten op een batterij van 1,5 V.

III Een weerstand van 2,0 kΩ wordt aangesloten op een spanningsbron met een vermogen van 1,0 W.

IV Een apparaat dat op het lichtnet is aangesloten gebruikt in een etmaal 20 kJ energie.

19 Batterij vasthouden

Als je een 3,7 V batterij uit een telefoon met twee vingers vastpakt, gaat er een stroompje lopen. De weerstand van de huid is op dat moment 100 kΩ voor beide stukjes die de batterij raken, voor beide vingers. De totale weerstand is dus 200 kΩ.

a Bereken de grootte van de stroom door je vingers.

Als je een touchscreen aanraakt, gaat er een stroompje door je vinger, via je lichaam, door je schoenzolen, naar de grond.

b Geef twee redenen waarom dit stroompje nog veel kleiner zal zijn dan je antwoord van opdracht a.

+20 Potloodstreep

Met een multimeter meet je dat een heel dikke potloodstreep op papier een weerstand heeft van 1,5 MΩ.

a Bereken de stroom die zal gaan lopen als je de uiteinden van de potloodstreep verbindt met de polen van een batterij van 4,5 V.

b Laat met een berekening zien dat de potloodstreep bij deze spanning niet als een gloeidraad zal oplichten.

+21 Weerstanden in serie

Je schakelt de volgende drie weerstanden in serie: 16 Ω (1,0 W), 8,0 Ω (0,40 W) en 4,0 Ω (0,25 W). De waarde tussen haakjes geeft het maximale vermogen dat de weerstand kan hebben, zonder dat deze beschadigd wordt. Deze serieschakeling wordt aangesloten op een regelbare voeding waarvan de spanning onbeperkt kan worden verhoogd.
Beredeneer welke weerstand als eerste zal worden beschadigd als je de spanning geleidelijk opvoert.

3 Weerstand van een draad

In deze paragraaf leer je:

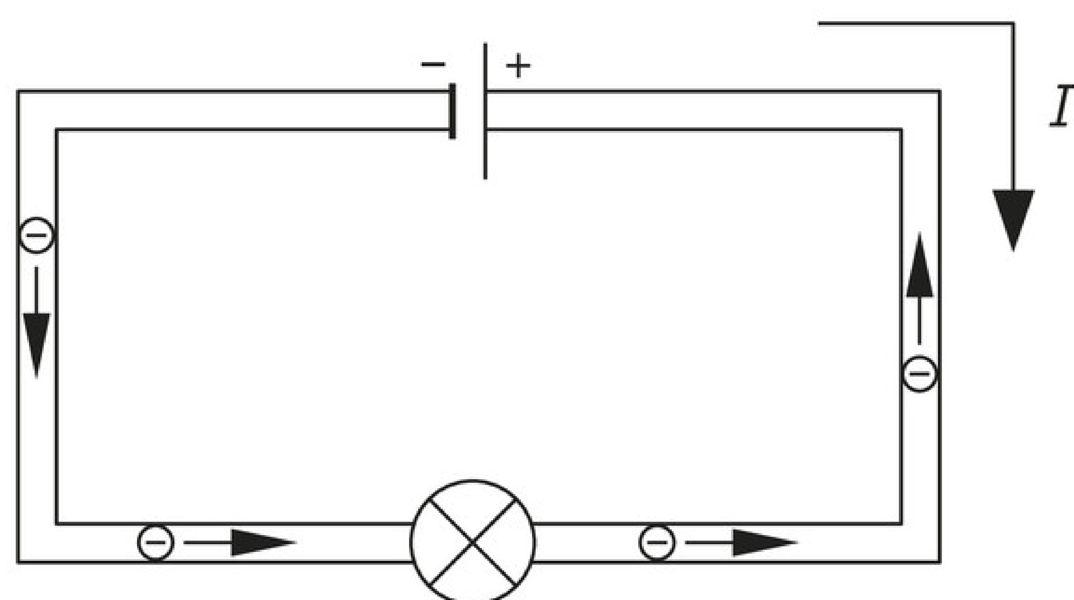
- waarvan de weerstand van een draad afhangt;
- berekeningen uitvoeren met de specificaties van een draad en de weerstand.

Meestal zijn stroomdraden gemaakt van koper met daaromheen een plastic omhulsel. Koper geleidt stroom goed, plastic juist niet. De elektrische geleiding hangt niet alleen van het materiaal af, maar ook van de afmetingen van de stroomdraad.

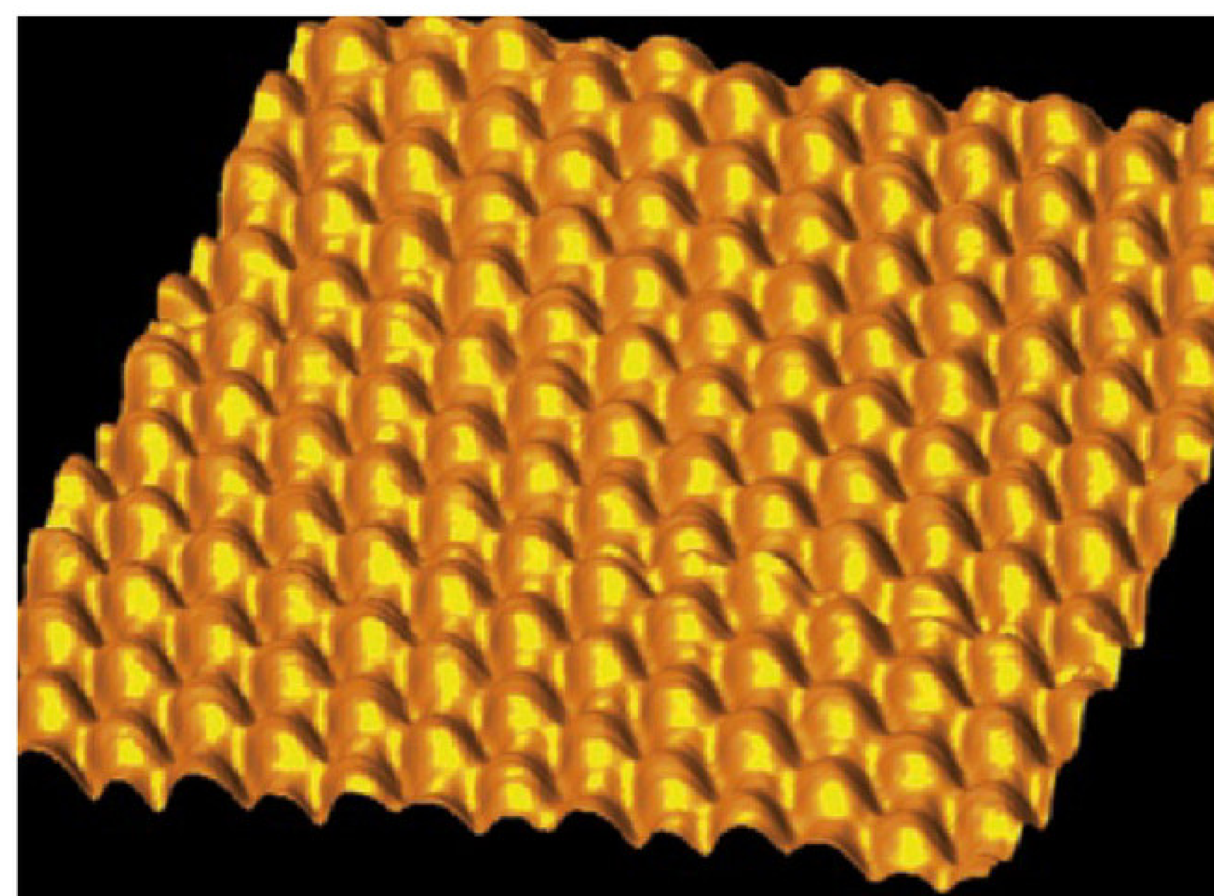
Model van een stroomdraad

In een stroomdraad bewegen elektronen, negatief geladen deeltjes, die worden aangetrokken door de pluspool van een spanningsbron. Elektronen stromen van min naar plus. Voordat elektronen werden ontdekt, hadden natuurkundigen al afgesproken dat elektrische stroom van plus naar min stroomt (figuur 6). Dat kan verwarrend werken, let daarop.

De weerstand van een draad hangt samen met de beweging van elektronen. Een koperen stroomdraad bestaat uit koperatomen die zijn geordend in een metaalrooster (figuur 7). Bij elk atoom hoort een vast aantal elektronen, 29 in het geval van koper. De meeste daarvan zijn sterk gebonden aan de kern van het koperatoom.



▲ **figuur 6** elektrische stroom (*I*) en elektronenstroom in een stroomkring



▲ **figuur 7** afbeelding van een koperoppervlak gemaakt met een rastertunnelmicroscoop

Per koperatoom zijn er echter enkele **valentie-elektronen**, die niet gebonden zijn aan één atoomkern. Onder invloed van een kleine kracht kunnen deze zich door het metaalrooster verplaatsen. Wanneer een elektron zich verplaatst, laat het een lege plek achter die snel wordt gevuld door een ander elektron. Zo verplaatsen de elektronen zich met zijn allen door de koperen draad.
Als de stroomkring niet gesloten is, ondervinden de elektronen wel een elektrische kracht van de spanningsbron, maar kunnen ze geen kant op. Zodra je de schakeling sluit, gaan de elektronen richting de positieve pool stromen. Maar de stroomdraad is geen lege ruimte. De elektronen moeten door een rooster bewegen en worden gehinderd. Gemiddeld bewegen ze wel de goede kant op, maar soepel gaat dat niet. Ze staan energie af aan het metaalrooster, dat daardoor opwarmt. Het effect hiervan is dat stroomdraden weerstand hebben en warm worden. Dit kun je vergelijken met het stromen van water in een rivier: er ontstaat een evenwicht tussen de invloed van de zwaartekracht en de wrijvingskracht, waarbij de stroomsnelheid in de rivier min of meer constant is. Als water geen weerstand zou ondervinden, dan zou het steeds sneller gaan, doordat de zwaartekracht het water blijft versnellen. Het versnelt net zo lang tot de weerstandskracht net zo groot is als de zwaartekracht. Zo probeert de spanning de elektronen steeds sneller te laten gaan, maar zorgt de weerstand voor een evenwichtssnelheid.

Weerstand van een stroomdraad

De weerstand van een stroomdraad hangt af van de lengte, de doorsnede, en het materiaal waarvan de draad is gemaakt. Hoe langer de draad, hoe moeilijker deze stroom geleidt en hoe hoger de weerstand. Dit is te vergelijken met een lang rietje waardoor je frisdrank probeert te drinken.
Hoe dikker de draad, hoe gemakkelijker de draad stroom geleidt en hoe lager de weerstand. Dit kun je vergelijken met een dik rietje, of met meerdere rietjes waardoor je frisdrank drinkt: dat gaat makkelijker.

De weerstand van een draad wordt gegeven door:

$$R = \frac{\rho \cdot l}{A}$$

Hierin is:
- R de weerstand van de draad in ohm (Ω);
- ρ de soortelijke weerstand van de draad in ohm keer meter (Ω m);
- l de lengte van de draad in meter (m);
- A de doorsnede van de draad in vierkante meter (m^2).

De **soortelijke weerstand** ρ is een materiaaleigenschap. In Binas vind je de soortelijke weerstand van verschillende materialen in de tabellen met stofeigenschappen. De eenheid 'ohm keer meter' wordt vaak uitgesproken als 'ohm-meter'.

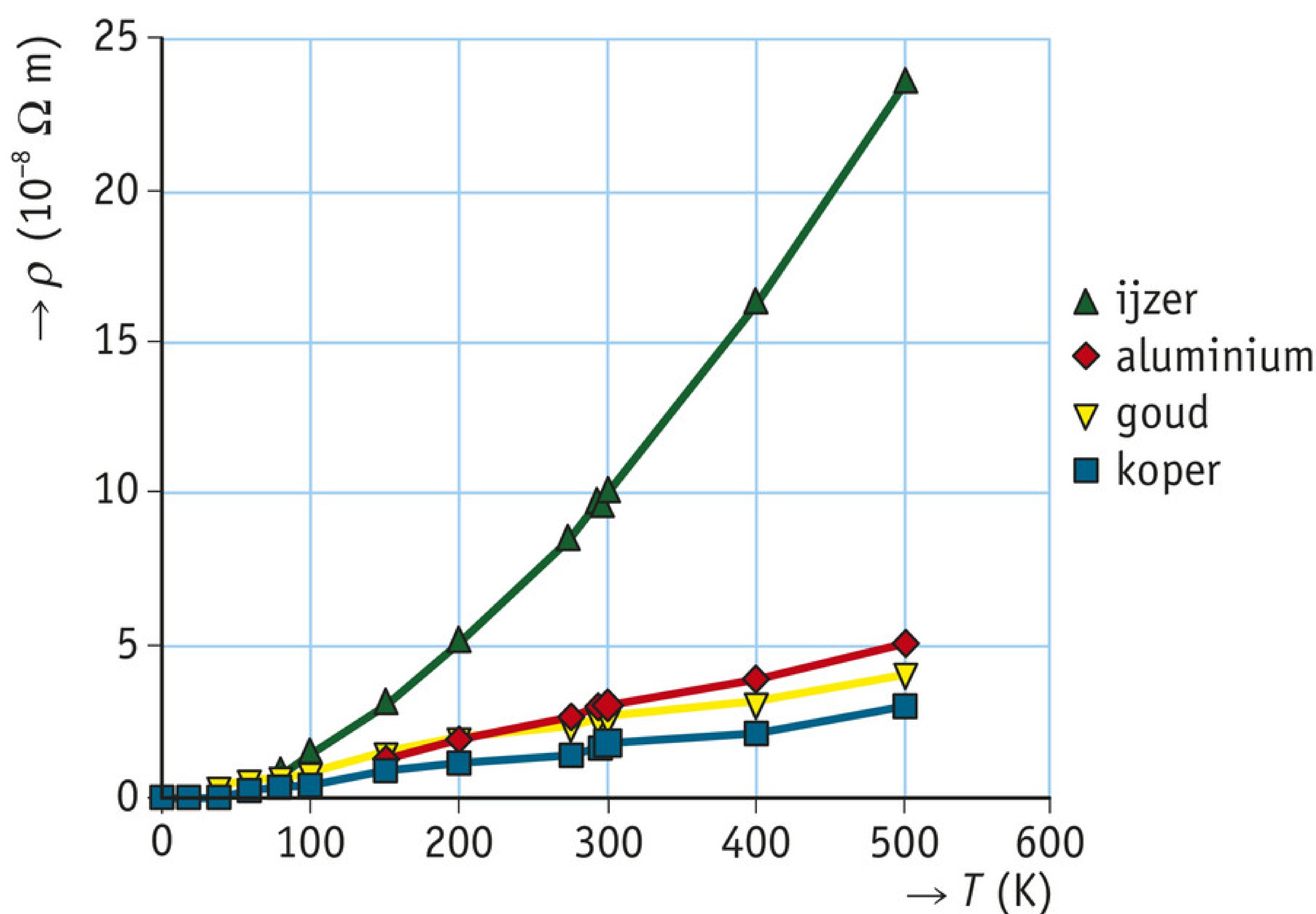
Voorbeeldopgave 5

De koperen draad tussen een geluidsinstallatie en een luidspreker bestaat uit twee 'aders'. De draad heeft een lengte van 4,0 m. De doorsnede van een ader is 2,0 mm^2.
Bereken de weerstand van een van de aders van deze draad.

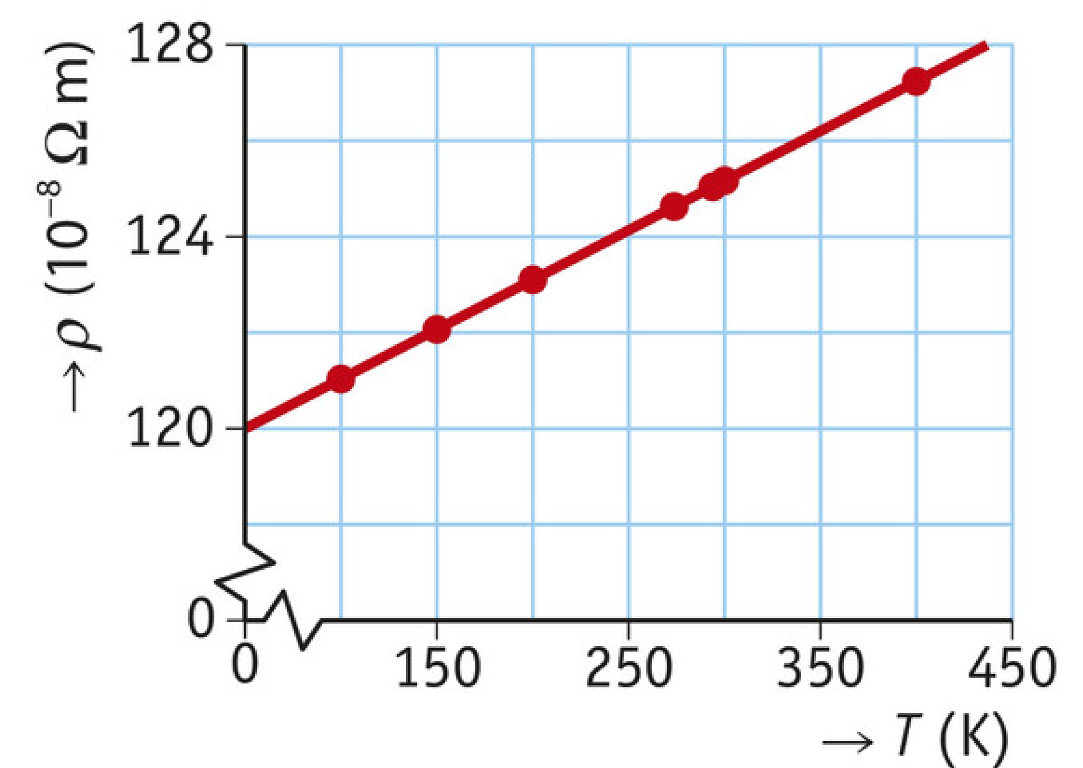
Uitwerking
Reken altijd eerst om naar de juiste eenheden: elke ader in de draad heeft een lengte van 4,0 m en een doorsnede van 2,0 mm^2 = $2{,}0 \cdot 10^{-6}$ m^2. De soortelijke weerstand van koper kun je vinden in Binas: $\rho = 17 \cdot 10^{-9}$ Ω m. Invullen van de gegevens in de formule voor de weerstand van een draad geeft:

$$R = \frac{17 \cdot 10^{-9} \times 4{,}0}{2{,}0 \cdot 10^{-6}} = 34 \cdot 10^{-3}\ \Omega = 34\ \text{m}\Omega$$

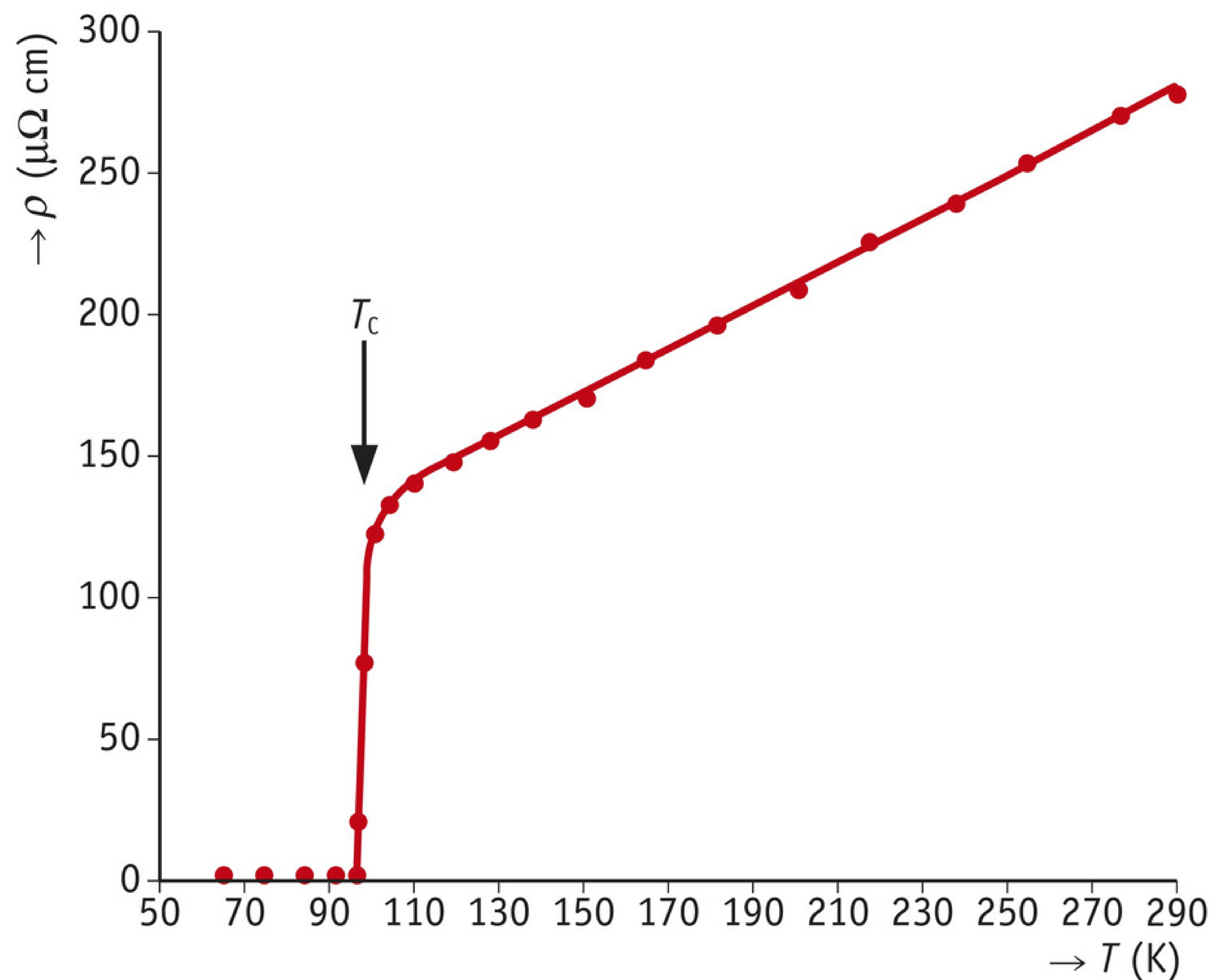
De soortelijke weerstand van de meeste materialen hangt af van de temperatuur. Meestal geldt: hoe lager de temperatuur, hoe lager de soortelijke weerstand (figuur 8 en 9).
Supergeleidende materialen hebben onder een bepaalde temperatuur helemaal geen weerstand meer. Het verschil met gewone geleiders is dat de soortelijke weerstand van een supergeleider onder een bepaalde temperatuur abrupt naar nul gaat (figuur 10).



▲ **figuur 8** soortelijke weerstand van verschillende metalen uitgezet tegen de temperatuur



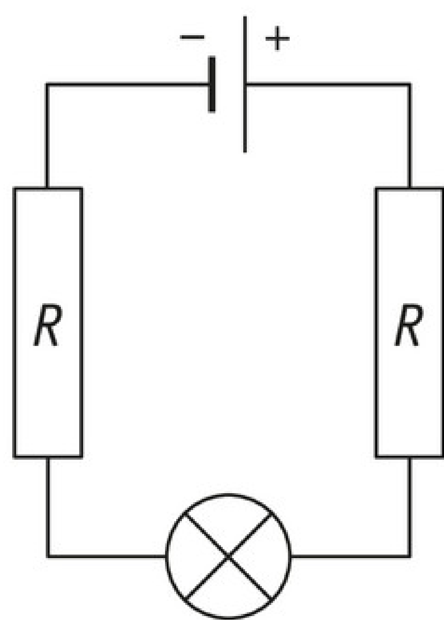
▲ **figuur 9** soortelijke weerstand van nichroom, een chroomnikkel-legering, bij verschillende temperaturen



▲ **figuur 10** Een supergeleider verliest zijn weerstand onder een bepaalde temperatuur.

Draden weergeven in een schakelschema

In schakelschema's geef je schematisch weer hoe een schakeling in elkaar zit. Bijvoorbeeld of componenten in serie of parallel geschakeld zijn, waar zich een schakelaar bevindt en of er een gelijkspanningsbron of wisselspanningsbron is aangesloten. De verbindingen tussen de componenten geef je weer met lijnen. De afspraak is dat die lijnen perfect geleidende draden voorstellen, dus zonder weerstand. De reden voor deze afspraak is dat het dan niet uitmaakt hoe lang je de lijnen tekent. Zo kun je het schakelschema overzichtelijk houden. In werkelijkheid hebben de draden natuurlijk wel weerstand. Wanneer je rekening moet houden met de weerstand van de draden, kun je de stroomdraden voorstellen als weerstanden met symbool R (figuur 11).



▲ **figuur 11** De weerstanden R geven hier de weerstand van de stroomdraden aan.

▶ **EXPERIMENT 2** Het materiaal van een metalen draad bepalen (onderzoekspracticum)

Onthoud!

- De weerstand (in Ω) van een draad wordt gegeven door: $R = \dfrac{\rho \cdot l}{A}$. Hierin is ρ de soortelijke weerstand van de draad (in Ω m), l de lengte van de draad (in m) en A de doorsnede van de draad (in m^2).
- In een draad die stroom geleidt, bewegen de elektronen. Doordat de elektronen zich door het metaalrooster moeten bewegen, ondervinden ze weerstand.
- De lijnen in een schakelschema stellen ideale stroomdraden voor: ze hebben geen weerstand.

Opdrachten

22 Eenheid
Controleer aan de hand van de formule voor de weerstand van een draad dat de eenheid van soortelijke weerstand ρ gelijk is aan $\Omega\,m$.

23 Analogie met vallen
Je kunt het stromen van elektronen naar een pluspool vergelijken met het vallen van massa's naar de aarde. Vul aan:
a Zowel bij een stroom die door een draad loopt als bij een regendruppel die valt ontstaat … (noem een energiesoort).

Vul hieronder steeds een *elektrische* grootheid in.
b Als een kogeltje van een grotere hoogte valt, heeft het meer zwaarte-energie. Je kunt dit vergelijken met een grotere …, waarbij een lading meer … heeft.
c Als een kogeltje door water valt, gaat het langzamer dan als het in lucht valt. Je kunt dit vergelijken met een stroom die loopt door een materiaal met een grotere ….
d Als er meer regendruppels van dezelfde hoogte vallen, kun je dat vergelijken met een grotere … bij dezelfde ….

24 Knikkers in tuinslang
Je kunt de elektronen die door een metaaldraad stromen vergelijken met knikkers die door een tuinslang bewegen.
Leg uit welke analogie beter is:
I Een draad die op een spanningsbron is aangesloten, is als een tuinslang waar je af en toe met grote snelheid een knikker in gooit.
II Een draad die op een spanningsbron is aangesloten, is als een tuinslang die vol zit met knikkers en waar je af en toe een knikker bij duwt, waardoor alle knikkers tegelijk opschuiven.

25 Soortelijke weerstand
In Binas staat een tabel met eigenschappen van metalen.
a Welk van de metalen die daar genoemd worden, heeft de hoogste soortelijke weerstand?
b Welk metaal heeft de laagste soortelijke weerstand?
c Vergelijk je antwoorden bij opdracht a en b met de soortelijke weerstand van koper. Druk het verschil in soortelijke weerstand ten opzichte van de soortelijke weerstand van koper in procenten uit.
d Geef twee argumenten waarom vaak voor koper wordt gekozen als materiaal voor het maken van stroomdraden.

26 Formule herschrijven
Ga uit van de formule voor de weerstand van een draad. Herschrijf deze formule zodat deze achtereenvolgens begint met:
a $l = \ldots$
b $A = \ldots$
c $\rho = \ldots$

27 Draad [1]
Een ronde stroomdraad is gemaakt van koper en heeft een diameter van 1,4 mm en een lengte van 3,8 m.
a Bereken de weerstand van de draad.

Door de draad gaat een stroom van 0,28 A.

b Bereken de spanning over de draad.

c Bereken de elektrische energie die in de draad per seconde wordt omgezet.

28 Draad [2]

Een ronde draad van aluminium met een lengte van 1,0 m is aangesloten op een spanningsbron, ingesteld op 0,10 V. Door de draad gaat een stroom van 3,5 A. De draad wordt op kamertemperatuur gehouden.
Bereken de diameter van de draad.

29 Draad [3]

Een ronde draad van een onbekend materiaal heeft een lengte van 1,5 m en een diameter van 1,2 mm. Als de draad op een spanningsbron van 2,5 V wordt aangesloten, loopt er een stroom van 4,2 A door de draad.

a Bereken de soortelijke weerstand van de draad.

b Bepaal met behulp van Binas van welk materiaal deze draad gemaakt zou kunnen zijn.

+30 Draden voor handschoen

In een handschoen die geschikt is om touchscreens te bedienen, zitten geleidende draden. Dat zijn nylondraden met een laagje zilver erop.

a Noem twee manieren om draden met een grotere geleidbaarheid te maken.

Een draad heeft een diameter van 0,10 mm en is 6,0 mm lang. Het zilverlaagje is 2,0 μm dik.

b Bereken de weerstand van de draad.

31 Draden veranderen

Een stroomdraad heeft een diameter van 2,0 mm, is 10 m lang en heeft een weerstand van 1,0 Ω.
Beredeneer hoe groot de weerstand van de volgende draden is.

a Stroomdraad A is 2× zo lang als de oorspronkelijke draad en 2× zo dik.

b Stroomdraad B is gemaakt van dezelfde hoeveelheid materiaal als de oorspronkelijke draad, alleen uitgerekt tot een lengte van 20 m.

c Stroomdraad C is even lang en even dik als de oorspronkelijke draad, alleen is hij hol. De diameter van de holle binnenkant is 1,0 mm.

32 Draden combineren

Je hebt een aantal identieke stukken stroomdraad. Elk stuk draad heeft een weerstand R. Je sluit n van deze draden in serie aan.

a Beredeneer met behulp van de formule voor de weerstand van een draad hoe groot de weerstand van deze n draden samen is. Druk je antwoord uit in R en n.

Je sluit n van deze draden vervolgens parallel aan.

b Beredeneer hoe groot de weerstand van deze draden samen is. Druk je antwoord weer uit in R en n.

33 Hoogspanningslijn

De langste hoogspanningslijn in Nederland ligt tussen Zwolle (Overijssel) en Meeden (Groningen) en heeft een lengte van 107 km. Het gemiddelde vermogen van deze lijn is 2630 MW bij een spanning van 380 kV.

a Bereken de gemiddelde stroomsterkte van deze lijn.

De lijn bestaat uit vier kabels die van Zwolle naar Meeden lopen en vier kabels die teruglopen van Meeden naar Zwolle. Deze kabels hebben weerstand.

b Teken het schakelschema van de hoogspanningskabels.

c Bereken de stroomsterkte door een van de kabels.

De kabels zijn gemaakt van aluminium en hebben een diameter van 12 cm.

d Bereken de weerstand van een van de kabels.

e Bereken het vermogen van elk van de kabels. Dit vermogen is het verlies aan elektrische energie in de kabels.

34 Lampjes

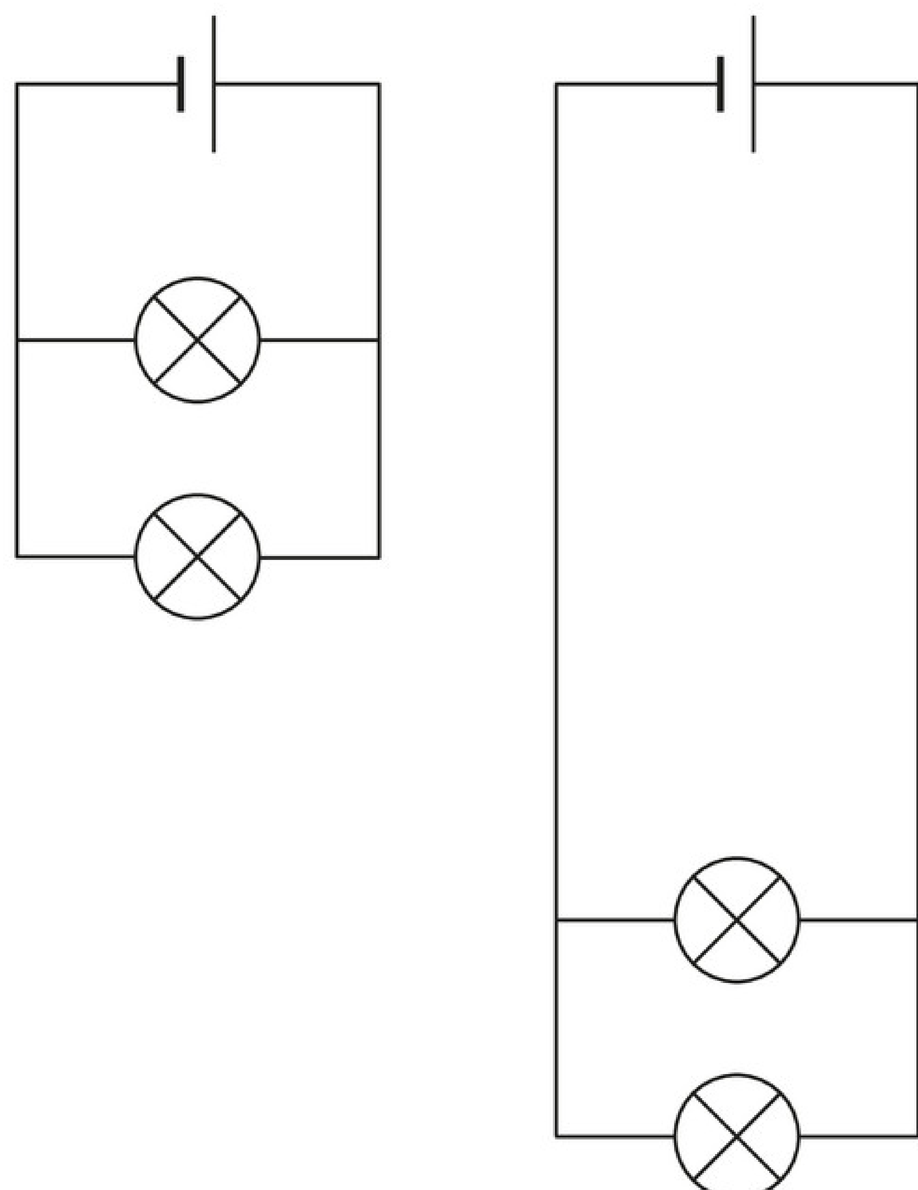
Bekijk de schakelschema's in figuur 12. De spanning van de bron is in beide gevallen hetzelfde. Ook zijn de lampjes in beide schakelingen hetzelfde.

a Leg uit dat de lampjes in de twee situaties even sterk zullen branden.

In werkelijkheid zullen de lampjes *niet* even sterk branden.

b Leg uit waarom niet.

c Teken een schakelschema waarin je rekening houdt met de weerstand van de draden waarmee de lampjes zijn aangesloten.



▲ **figuur 12** twee schakelingen



▲ **figuur 13** verwarmingselement in een waterkoker

+35 Waterkoker

Het verwarmingselement van een waterkoker bestaat uit een dikke metalen spiraal (figuur 13). De waterkoker heeft een vermogen van 2,3 kW.

a Bereken hoe groot de weerstand van het verwarmingselement is.

b Waarom zal er op de buitenkant van de metalen spiraal die je in figuur 13 ziet geen spanning staan?

In de metalen spiraal van figuur 13 bevindt zich een nichromen draad met een doorsnede van 1,0 mm^2. De nichromen draad is elektrisch geïsoleerd van het metalen omhulsel.

c Bereken de lengte van de draad.

d Hoe zou je een draad met de lengte die je bij c hebt berekend in de metalen spiraal kunnen krijgen die je in figuur 13 ziet?

e Leg uit waarom er geen nichromen draad is gebruikt die even lang is als het verwarmingselement (maar wel iets dunner).

f Bekijk het diagram in figuur 9. Om welke twee redenen is er gekozen voor nichroom? Gebruik Binas.

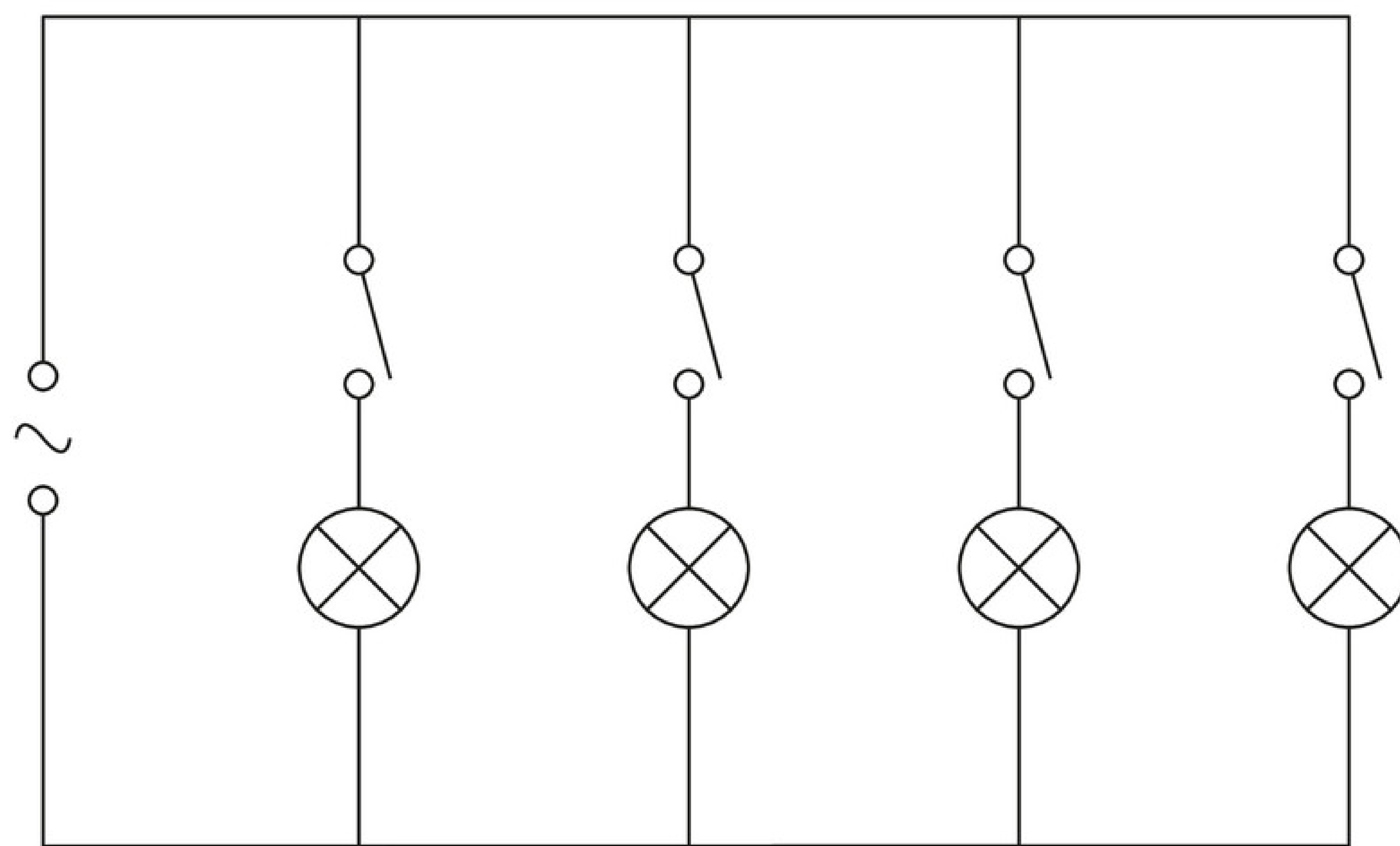
4 Stroom en spanning verdelen

In deze paragraaf leer je:
- redeneren met de manier waarop spanning en stroom zich verdelen in serie- en parallelschakelingen;
- werken met de wetten van Kirchhoff, die gelden voor stroom en spanning in willekeurige schakelingen.

In de praktijk heb je vaak te maken met meerdere apparaten in een schakeling. In huis zijn die apparaten parallel geschakeld. Er bestaan ook toepassingen van serieschakelingen.

Parallelschakeling

Op een stekkerdoos zijn vier apparaten aangesloten. De stekkerdoos zorgt ervoor dat elk van de vier apparaten zijn eigen stroomkring heeft, waarop in alle gevallen een spanning van 230 V staat. Op deze manier krijgt niet alleen elk apparaat de juiste spanning, maar kunnen de apparaten ook onafhankelijk van elkaar worden aan- en uitgezet (figuur 14).



▲ **figuur 14** schema van een parallelschakeling

Het lijkt vreemd dat elk apparaat in een **parallelschakeling** de totale spanning krijgt. Het helpt als je je realiseert dat de spanning *U* de energie *per lading* is. Een spanning van 230 V betekent dat elke coulomb (C) lading 230 J energie meekrijgt bij de ene pool van de spanningsbron en deze weer kwijt is bij de andere pool. Deze lading geeft al die energie onderweg af. Daardoor worden bijvoorbeeld draden heet of komt een motor in beweging.
In een parallelschakeling neemt een bepaalde lading slechts een van de routes. Die lading geeft alle energie af op de gevolgde route.
Door elk parallel aangesloten apparaat gaan elektronen met dezelfde, door de spanningsbron meegegeven energie. De spanning is dus voor elk apparaat gelijk aan de spanning van de bron.
Als er twee apparaten op de stekkerdoos zijn aangesloten, geldt dat als er bijvoorbeeld 1,00 A door de televisie loopt en 5,00 A door de stofzuiger, de stroomsterkte in de toevoer- en de afvoerdraad van de stekkerdoos gelijk is aan 6,00 A. In de stekkerdoos splitst de stroom zich. Nadat de deelstromen door de apparaten zijn gegaan, komen ze uiteindelijk in de stekkerdoos weer bij elkaar, en de hoofdstroom loopt terug naar het stopcontact.

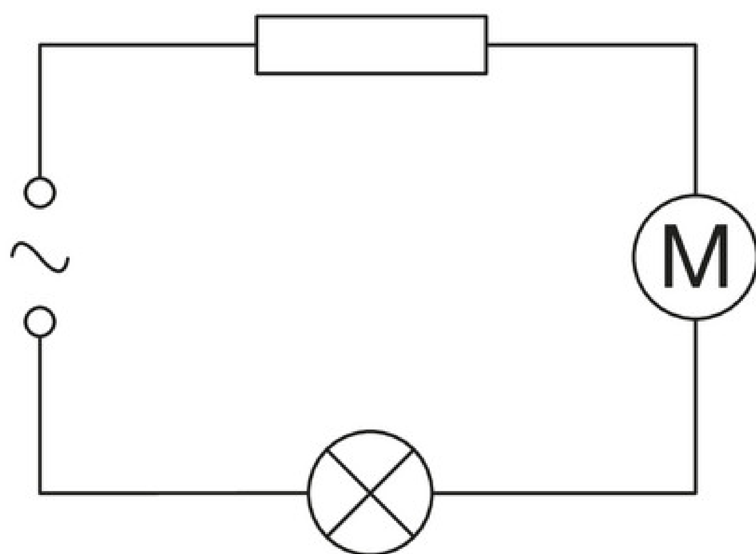
In het algemeen gelden twee regels voor twee apparaten die parallel zijn geschakeld:

$U_1 = U_2$
en
$I_{totaal} = I_1 + I_2$

Serieschakeling

De regels waaraan de stroomsterkte en de spanning in een serieschakeling (figuur 15) voldoen, zijn precies andersom vergeleken met die voor een parallelschakeling:

$I_1 = I_2$
en
$U_{totaal} = U_1 + U_2$



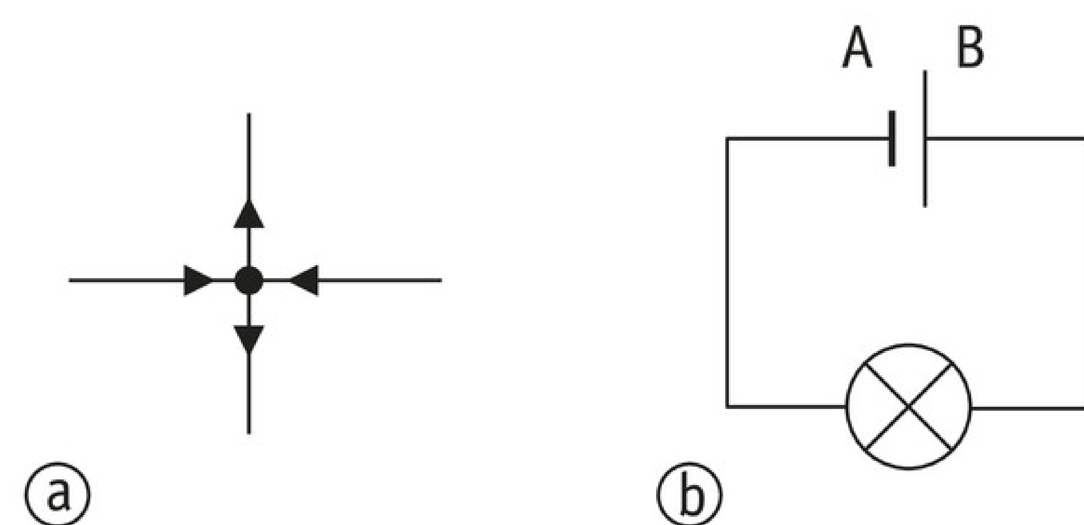
▲ **figuur 15** schema van een serieschakeling waarin een apparaat met een motor is opgenomen

In een **serieschakeling** kan elke lading slechts één route volgen, er zijn geen splitsingen of punten waar stromen zich samenvoegen. Alles wat door weerstand 1 stroomt, moet ook door weerstand 2 stromen. Anders zou er lading in het niets verdwijnen, of zou zich lading ophopen. Dat is allebei onmogelijk, elektronen verdwijnen niet en een opeenhoping van lading zou zichzelf ongedaan maken doordat de ladingen elkaar afstoten. De regel $I_1 = I_2$ voor een serieschakeling is een gevolg van de wet van behoud van lading.
Spanning is gedefinieerd als energie per lading. Als een coulomb lading bij de ene pool van een batterij 4,5 J energie meekrijgt, en er mag slechts 1,5 J in een lampje worden omgezet, dan moet je ervoor zorgen dat die coulomb lading elders op de route 3,0 J kwijtraakt. Dat gebeurt in de weerstand die in serie met het lampje is geschakeld. Zo zie je dat de regel $U_{totaal} = U_1 + U_2$ voor een serieschakeling een speciaal geval is van de wet van behoud van energie.

Algemene regels voor schakelingen

In het eerste deel van deze paragraaf zijn twee situaties met weerstanden bekeken, eerst parallel en daarna in serie. De Duitse natuurkundige Gustav Kirchhoff (1824–1887) formuleerde twee regels die voor alle schakelingen geldig zijn, ook als de schakeling niet is op te splitsen in ‘parallelle stukjes’ en ‘seriestukjes’. De wetten van Kirchhoff luiden:

1. Voor elk punt in een schakeling geldt $\Sigma_i I_i = 0$.
   Voor elk punt in een schakeling geldt dat er net zoveel stroom naartoe loopt als ervan af. Stromen naar het punt toe worden positief gerekend, stromen ervanaf negatief. Als vier draden aan een punt vastzitten, dan tel je vier stromen bij elkaar op (figuur 16a). De eerste wet is de **stroomwet van Kirchhoff**.
2. Voor elke stroomkring geldt $\Sigma_i U_i = 0$. Als vanaf een bepaald beginpunt een route wordt gevolgd die uiteindelijk weer bij het beginpunt uitkomt, dan is de totale spanning gelijk aan 0 V. De spanning van een bron reken je positief, die van een weerstand negatief (figuur 16b). De tweede wet is de **spanningswet van Kirchhoff**.



▲ **figuur 16** (a) stromen naar een punt (bij eerste wet van Kirchhoff) en (b) kring die je kunt rondgaan (bij tweede wet van Kirchhoff)

De tweede regel houdt ook in dat de spanning tussen twee punten onafhankelijk is van de route waarlangs je van het ene naar het andere punt loopt. Van deze algemene regels kun je zeggen dat de eerste regel het gevolg is van de wet van behoud van lading, en de tweede van de wet van behoud van energie. De regels voor schakelingen met alleen weerstanden in serie of alleen weerstanden parallel, zijn speciale gevallen van de wetten van Kirchhoff.

Onthoud!

- Voor twee weerstanden die parallel zijn geschakeld geldt: $U_1 = U_2$ en $I_{totaal} = I_1 + I_2$
- Voor twee weerstanden die in serie zijn geschakeld geldt: $I_1 = I_2$ en $U_{totaal} = U_1 + U_2$
- De wetten van Kirchhoff luiden:
  1 Voor elk punt in een schakeling geldt dat er net zoveel stroom naartoe loopt als ervandaan.
  2 Als vanaf een bepaald beginpunt een route wordt gevolgd die uiteindelijk weer bij het beginpunt uitkomt, dan is de totale spanning gelijk aan 0 V.

  Dit is equivalent met:
  1 Voor elk punt in een schakeling geldt $\Sigma_i I_i = 0$.
  2 Voor elke stroomkring geldt $\Sigma_i U_i = 0$.

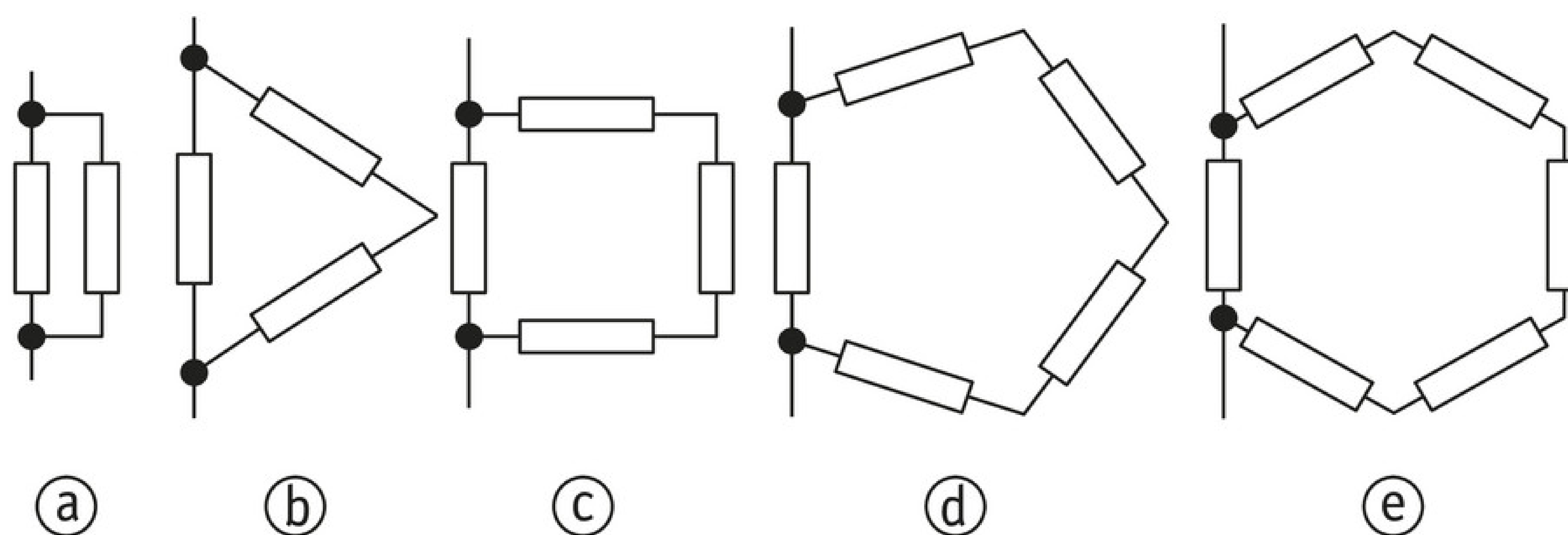
Opdrachten

36 Multitouch
Als je met duim en wijsvinger iets uitvergroot op je smartphone, heb je een parallelschakeling van twee weerstanden die het schermpje met de rest van je lichaam verbinden.
Leg uit wat bekend is over de (minuscule) spanningen over duim en wijsvinger en over de stroompjes door duim, wijsvinger en door de rest van het lichaam.

37 Stekkerdoos
Op een stekkerdoos zijn een waterkoker met vermogen 1,8 kW en een koffiezetapparaat met vermogen 500 W aangesloten.
a Bereken de stroomsterkte door de draad van de stekkerdoos.

Als deze totale stroom groter is dan 16 A, brandt de zekering door.
b Bereken hoe groot het vermogen is van de apparaten die je tegelijk met de waterkoker en het koffiezetapparaat kunt aansluiten, zonder dat de zekering doorbrandt.

38 Stroom berekenen
In elk van de figuren 17a tot en met 17e staat over de twee aansluitpunten een spanning van 1,0 V. Elke afzonderlijke weerstand heeft een waarde van 1,0 Ω. In een serieschakeling kun je alle weerstanden optellen om de totale weerstand te vinden.
Bereken in alle gevallen de grootte van de totale stroom die loopt tussen de aansluitpunten.

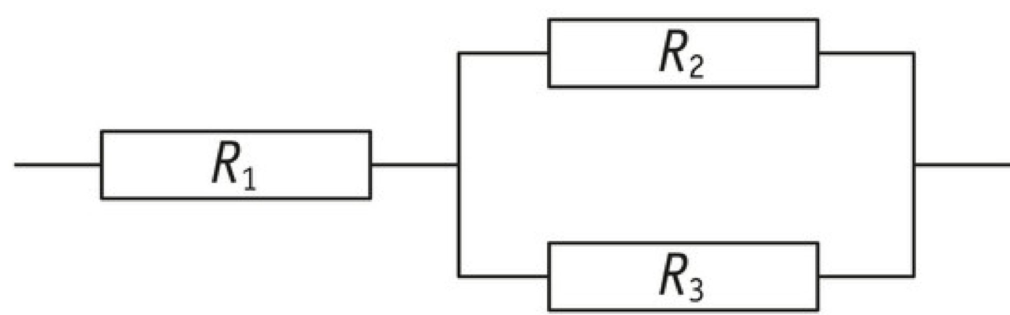


▲ **figuur 17** vijf schakelingen

39 Lampje en batterij
Je hebt een batterij van 4,5 V en een lampje waarop staat: 6,0 W; 1,5 V.
a Leg uit hoe je een extra weerstand in de schakeling moet opnemen om ervoor te zorgen dat het lampje goed brandt en bereken de benodigde weerstandswaarde.
b Leg uit dat het niet lukt het lampje te laten branden als je een batterij van 1,5 V hebt en een lampje waarop staat: 6,0 W; 4,5 V.

40 Weerstandenpuzzel
In de schakeling van figuur 18 zijn de drie weerstanden bekend: $R_1 = 10\ \Omega$, $R_2 = 20\ \Omega$ en $R_3 = 30\ \Omega$. Je meet dat I_2 gelijk is aan 1,0 A.
a Bereken de stromen door en de spanningen over alle drie de weerstanden.
b Bereken de totale stroom door en de totale spanning over de schakeling.

Je kunt dus met één enkele meting alles vastleggen.
c Leg uit of het uitmaakt welke van de afzonderlijke spanningen of stromen je meet.



▲ **figuur 18** combinatie van drie weerstanden

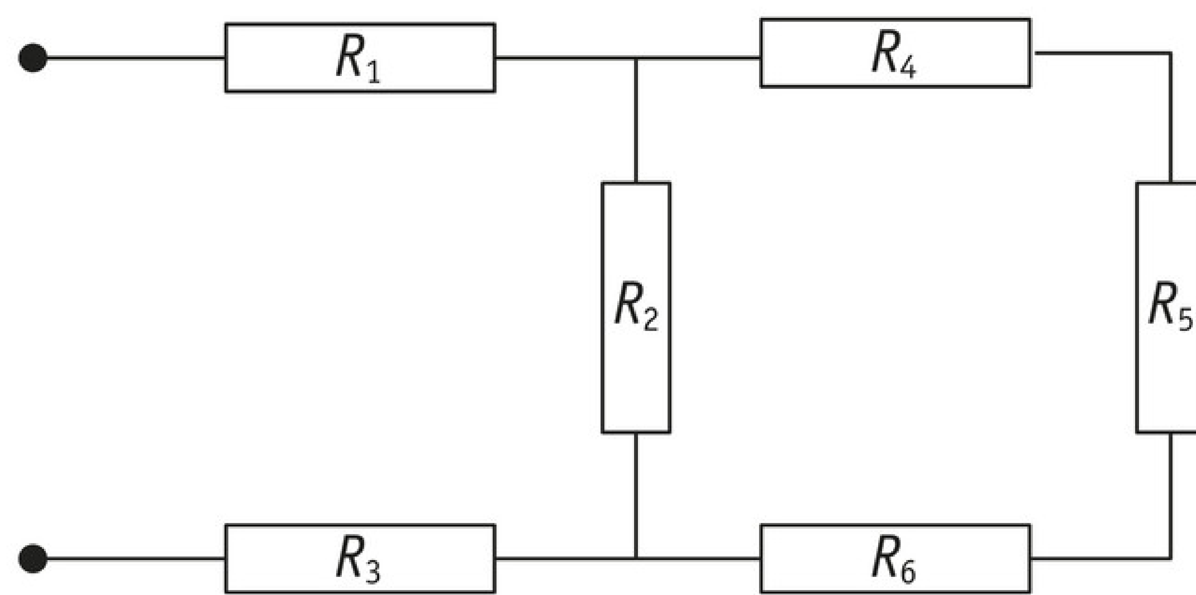
41 Wet van behoud van auto's
Op een bepaalde snelweg is een constante verkeersstroom van 100 auto's per minuut. Er zijn 30 auto's per minuut die één bepaalde afslag nemen.
a Hoeveel auto's per minuut vervolgen hun weg op de snelweg?
b Welke wet van Kirchhoff is analoog aan deze beschrijving van het aantal auto's op de snelweg?

42 Speciale gevallen
a De regel $I_{totaal} = I_1 + I_2$ voor een parallelschakeling is een speciaal geval van een van de algemene wetten van Kirchhoff. Welke?
b Leg uit hoe de stroomregel voor serieschakelingen volgt uit de algemene wetten van Kirchhoff.

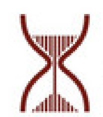
43 Stroommeters en spanningsmeters
Als je een meting doet, is het de bedoeling dat het doen van de meting de oorspronkelijk bestaande situatie zo min mogelijk verandert. Je wilt in een schakeling de stroomsterkte meten. Dat doe je door de schakeling te verbreken, een stroommeter in serie te zetten met de rest van de schakeling en alles opnieuw aan te sluiten.
a Leg met behulp van de regel voor spanningen in een serieschakeling uit dat er weinig spanning over de stroommeter zal moeten staan.
b Leg met behulp van een van de wetten van Kirchhoff uit dat alle stroom door de stroommeter zal gaan.
c Leg uit dat een stroommeter een kleine weerstand moet hebben.

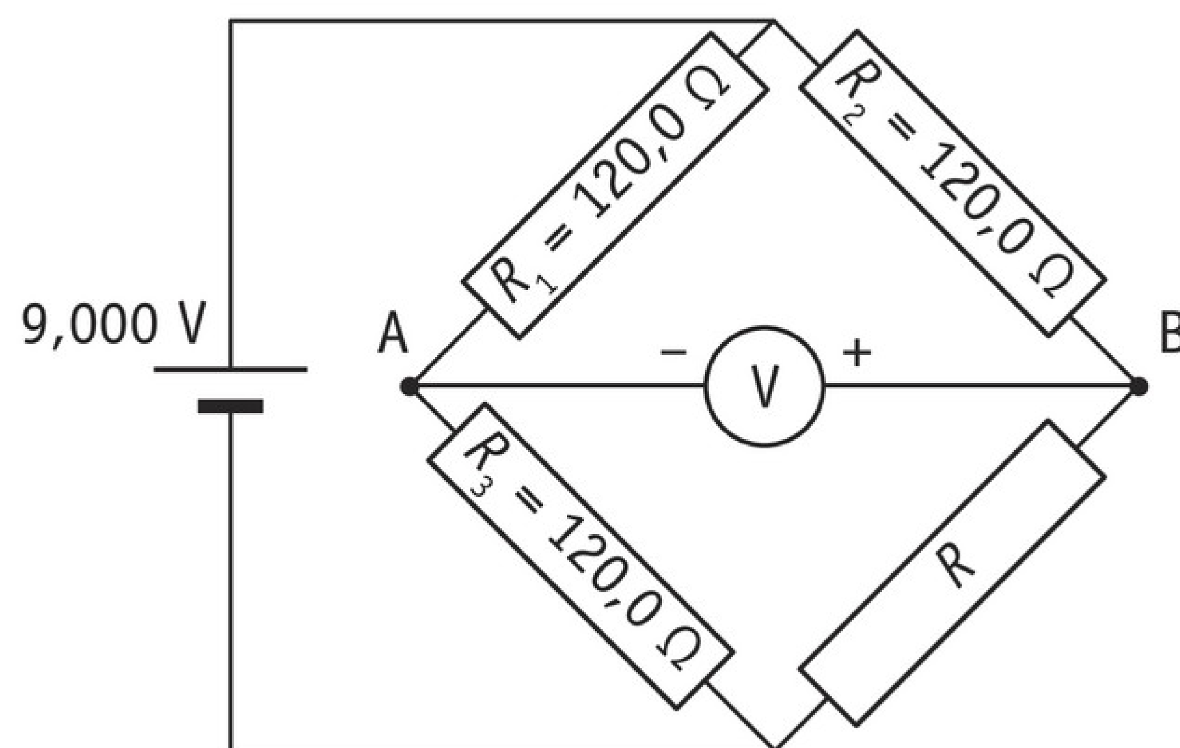
Nu wil je in dezelfde schakeling de spanning over een van de elementen meten. Je zet een spanningsmeter parallel aan het element.
d Leg met behulp van een van de wetten van Kirchhoff uit dat er weinig stroom door de spanningsmeter moet lopen.
e Leg met behulp van een van de wetten van Kirchhoff uit dat over de spanningsmeter dezelfde spanning staat als over het element waar het parallel aan staat.
f Leg uit dat een spanningsmeter een grote weerstand moet hebben.

44 Schakeling
In de schakeling van figuur 19 loopt door weerstand R_5 een stroom van 1,0 A. Elke afzonderlijke weerstand heeft een waarde van 1,0 Ω.
Bereken voor elke weerstand de stroomsterkte.



▲ **figuur 19** combinatie van zes weerstanden

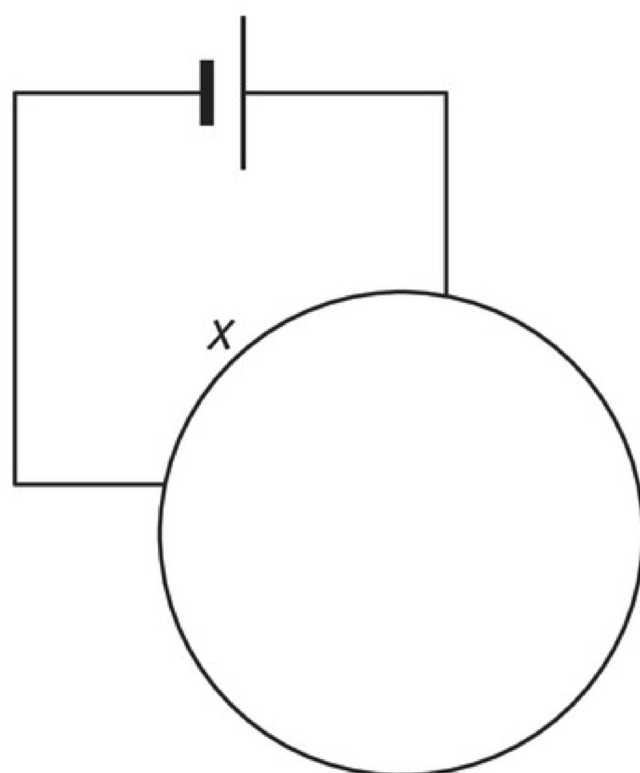

45 Rekstrookjes
Rekstrookjes zijn weerstanden waarvan de weerstand verandert als de lengte verandert. Je kunt ze op een voorwerp plakken. Als dat voorwerp dan langer of korter wordt (of buigt) verandert de elektrische weerstand van het strookje. Zo kun je waarnemen of de lengte van het voorwerp verandert. Om de weerstand van zo'n rekstrookje nauwkeurig te bepalen wordt wel een schakeling als in figuur 20 gebruikt. Deze bestaat uit drie weerstanden van 120,0 Ω terwijl het rekstrookje als vierde weerstand in de schakeling is opgenomen. In een bepaalde situatie geeft de spanningsmeter tussen A en B een spanning weer van 29,0 mV.
Bereken de weerstand van het rekstrookje in deze situatie.



▲ **figuur 20** schakeling met rekstrookje *R*

+46 Cirkel
Een stuk draad heeft een lengte van 1,0 m en een weerstand van 1,0 Ω. Het is in een cirkel gelegd en aangesloten op de manier van figuur 21. De spanning tussen de aansluitpunten is 1,0 V. Tussen de aansluitpunten zit aan de linkerkant een stuk draad van lengte x.

Laat zien dat de totale stroomsterkte gelijk is aan $\dfrac{1}{x(1-x)}$



◀ **figuur 21** stuk draad in de vorm van een cirkel

5 Totale weerstand

In deze paragraaf leer je:
- de totale weerstand berekenen voor serieschakelingen;
- de totale weerstand berekenen voor parallelschakelingen.

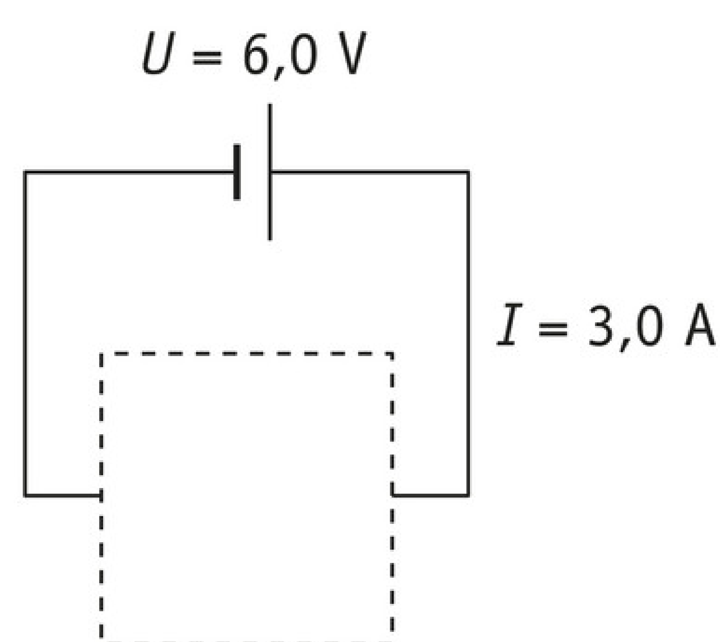
De weerstand van een elektrische component geeft aan hoe groot de stroomsterkte door de component is bij een bepaalde spanning. Dan weet je ook het vermogen van de component. Hetzelfde geldt voor een complete schakeling. Wanneer je de weerstand van de hele schakeling kent, weet je ook hoe groot de stroomsterkte is bij een bepaalde spanning en daarmee het vermogen van de schakeling. Daarom is het handig deze totale weerstand te kunnen berekenen.

▶ **EXPERIMENT 3** De vervangingsweerstand van serie- en parallelschakelingen (begripspracticum)

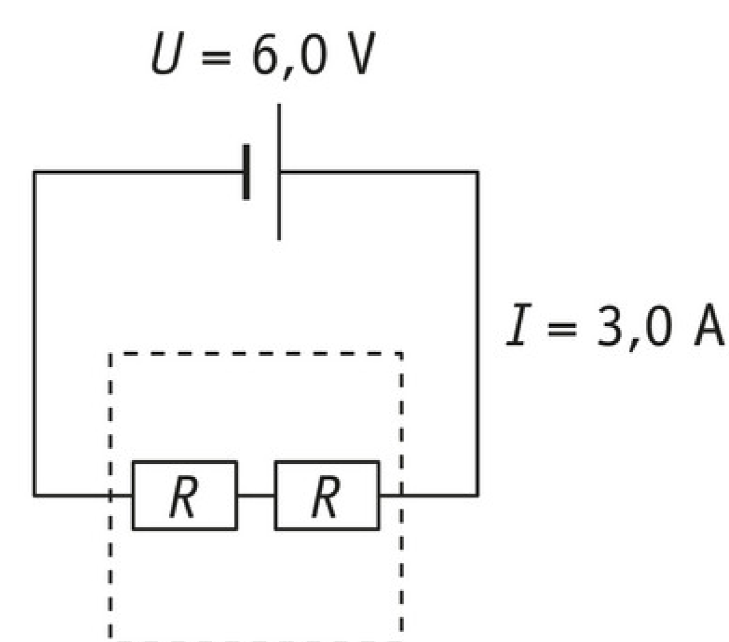
Totale weerstand van een serieschakeling

Stel je een kastje voor dat je op een spanningsbron kunt aansluiten. Je weet niet wat er in het kastje zit. Als je er een spanning van 6,0 V op zet, gaat er een stroomsterkte van 3,0 A lopen (figuur 22). In paragraaf 1 heb je geleerd dat het vermogen van het kastje gelijk is aan

$P = U \cdot I = 6{,}0 \times 3{,}0 = 18$ W. De weerstand kun je ook berekenen: $R = \frac{U}{I} = \frac{6{,}0}{3{,}0} = 2{,}0\ \Omega$ (paragraaf 2).



▲ **figuur 22** Een kastje is aangesloten op een spanningsbron.



▲ **figuur 23** In het kastje zitten twee identieke weerstanden.

Als je het kastje openschroeft, ontdek je dat er twee identieke weerstanden in serie geschakeld zijn (figuur 23). Samen hebben deze weerstanden blijkbaar een weerstand van 2,0 Ω. Dit is de totale weerstand van de in serie geschakelde weerstanden. Zo heeft iedere schakeling een totale weerstand. Dit wordt ook wel de **vervangingsweerstand** genoemd. De totale weerstand van een schakeling is gelijk aan de totale spanning over de schakeling, gedeeld door de totale stroomsterkte door de schakeling:

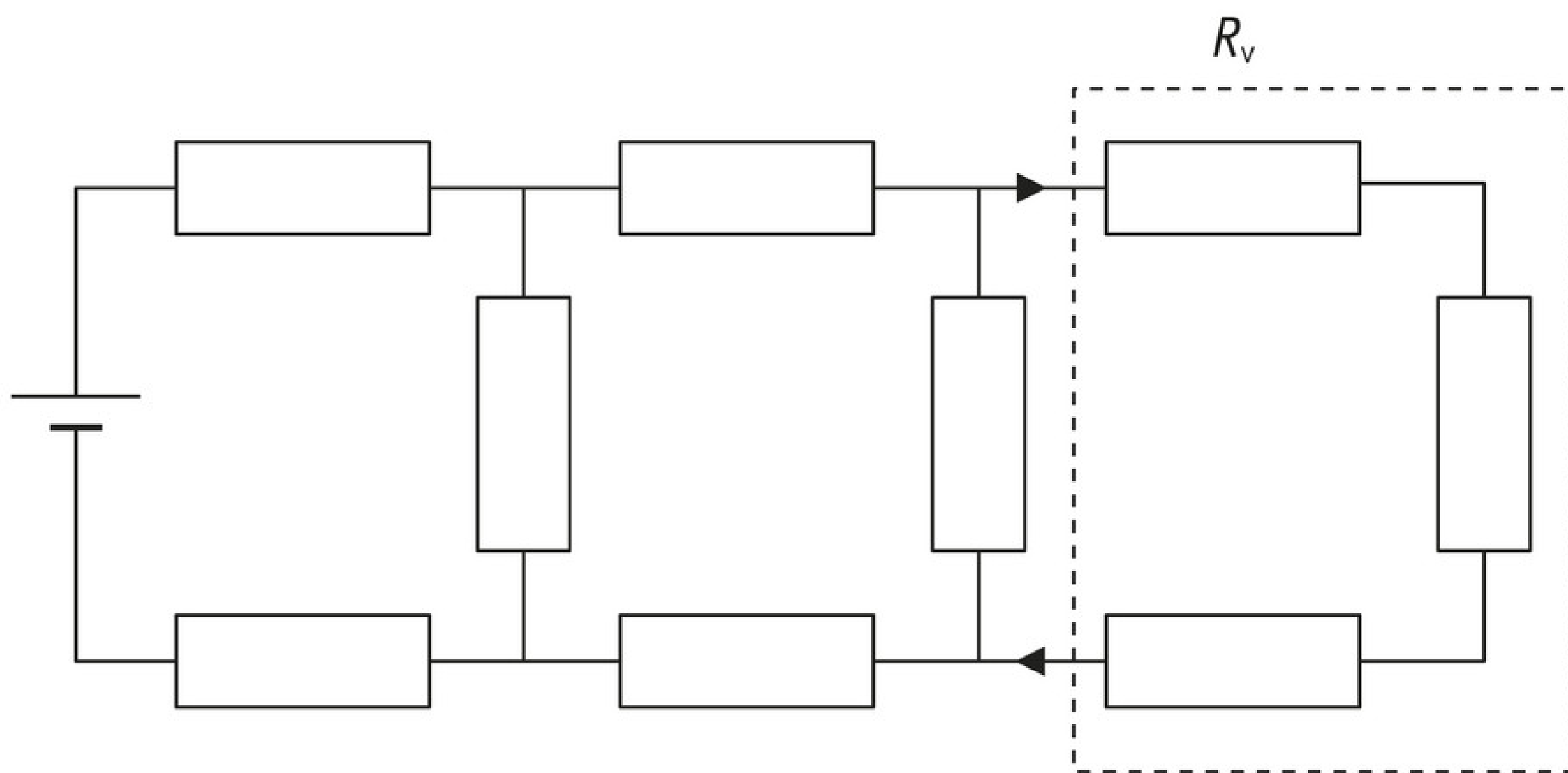
$$R_{tot} = \frac{U_{tot}}{I_{tot}}$$

Hierin is:
- R_{tot} de totale weerstand in ohm (Ω);
- U_{tot} de totale spanning in volt (V);
- I_{tot} de totale stroomsterkte in ampère (A).

Voor een serieschakeling heb je in paragraaf 4 geleerd dat $U_{tot} = U_1 + U_2$ en $I_{tot} = I_1 = I_2$. Voor de totale weerstand van een serieschakeling geldt daarom:

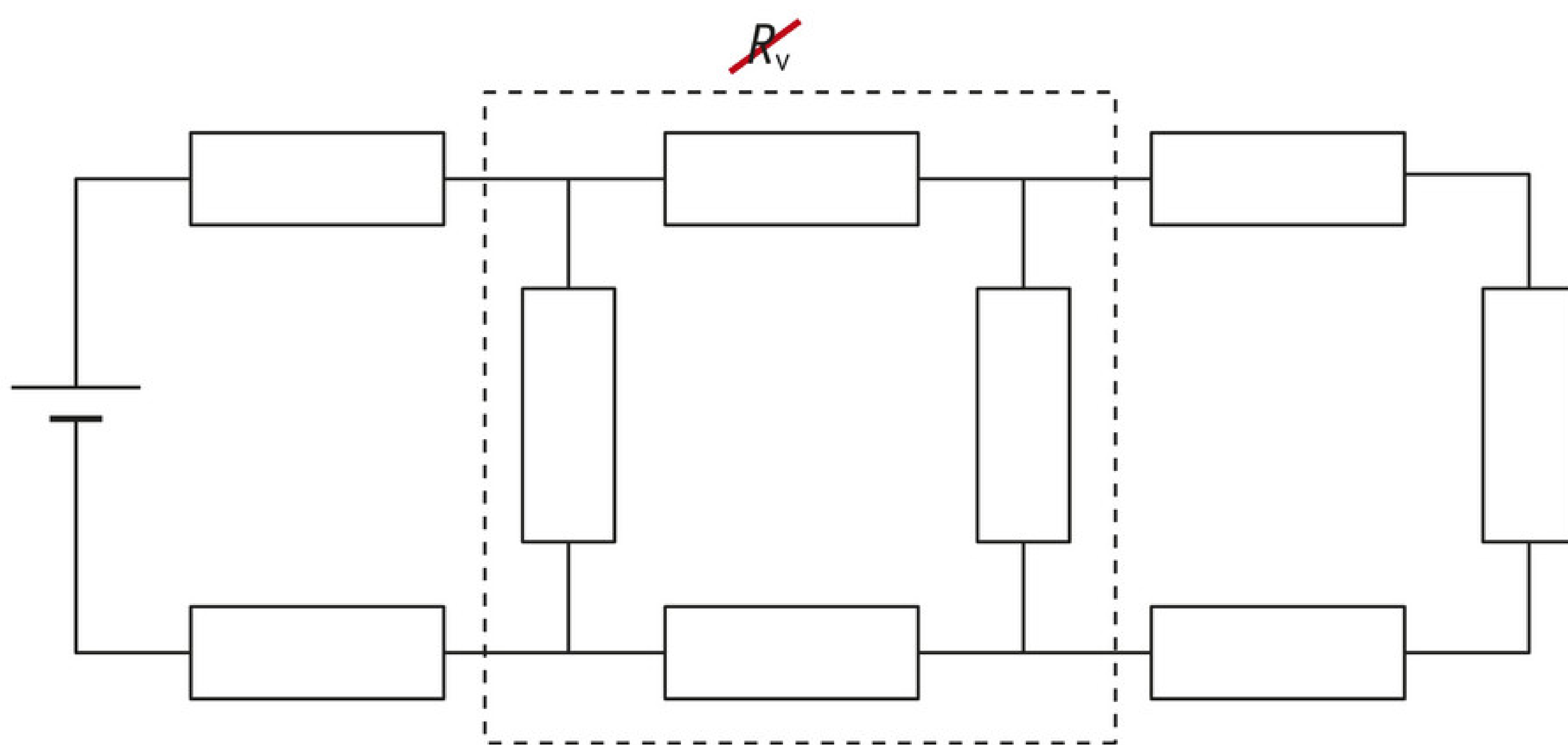
$$R_{tot} = \frac{U_{tot}}{I_{tot}} = \frac{U_1 + U_2 + \ldots}{I_{tot}} = \frac{U_1}{I_1} + \frac{U_2}{I_2} + \ldots = R_1 + R_2 + \ldots$$

De totale weerstand van in serie geschakelde componenten is dus gelijk aan de som van de weerstanden van de afzonderlijke componenten. De twee identieke in serie geschakelde weerstanden in figuur 23 hebben dus elk een weerstand van 1,0 Ω.
Je kunt van iedere combinatie van componenten de weerstand bepalen, als je ze maar (denkbeeldig) in een kastje kunt stoppen waar één draad in- en één draad uitgaat (figuur 24). Voor zo'n situatie is het handiger de term vervangingsweerstand te gebruiken, omdat je die componenten zou kunnen vervangen door een weerstand met een even grote weerstandswaarde. Het gaat dan niet om de totale weerstand van de schakeling, maar van het stukje dat je bekijkt.



▲ **figuur 24** Je kunt de vervangingsweerstand bepalen van de weerstanden in het 'kastje'.

In figuur 25 zie je een voorbeeld waar het bepalen van de vervangingsweerstand misgaat. In deze situatie zijn er vier draden op het 'kastje' aangesloten. Dan kun je niet meer zeggen welke stroom erin gaat en welke spanning erop staat.



▲ **figuur 25** Het is niet mogelijk de vervangingsweerstand te bepalen van de weerstanden in het getekende 'doosje'.

Totale weerstand van een parallelschakeling

De totale weerstand van een parallelschakeling volgt ook uit de totale stroomsterkte en spanning. Om de vervangingsweerstand voor een parallelschakeling te bepalen, is het makkelijker naar de geleidbaarheid G te kijken. Aangezien $G = \frac{1}{R}$, geldt voor de totale geleidbaarheid van een schakeling:

$$G_{tot} = \frac{I_{tot}}{U_{tot}}$$

In paragraaf 4 heb je geleerd dat voor een parallelschakeling geldt: $U_{tot} = U_1 = U_2$ en $I_{tot} = I_1 + I_2$. Hiermee kun je de totale geleidbaarheid voor een parallelschakeling berekenen:

$$G_{tot} = \frac{I_{tot}}{U_{tot}} = \frac{I_1 + I_2 + ...}{U_{tot}} = \frac{I_1}{U_1} + \frac{I_2}{U_2} + ... = G_1 + G_2 + ...$$

De geleidbaarheid van parallel geschakelde componenten is dus gelijk aan de som van de geleidbaarheid van de afzonderlijke componenten. Met de formule voor geleidbaarheid, $G = \frac{1}{R}$, volgt dat de totale weerstand van een parallelschakeling voldoet aan:

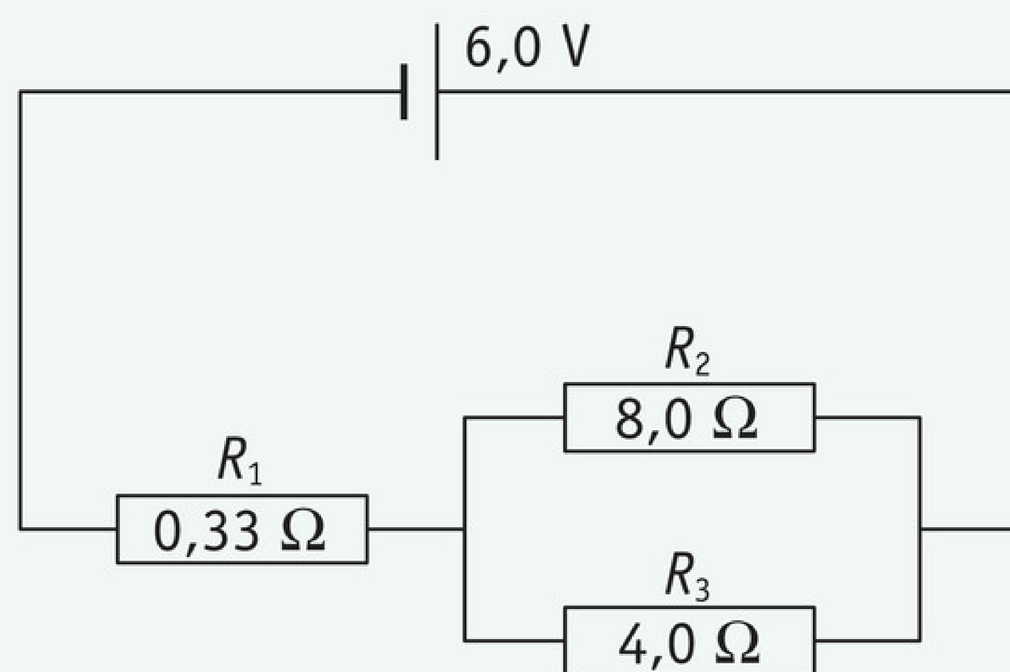
$$\frac{1}{R_{tot}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \ldots$$

Voorbeeldopgave 6

Bekijk de schakeling in figuur 26.

a Bereken de totale weerstand van deze schakeling.

b Bereken de totale stroomsterkte bij een totale spanning van 6,0 V.



▲ **figuur 26** schakeling met drie weerstanden

Uitwerking

a De totale weerstand kun je in twee stappen berekenen. Bereken eerst de vervangingsweerstand R_p van de twee parallel geschakelde weerstanden: $\frac{1}{R_p} = \frac{1}{8,0} + \frac{1}{4,0} = \frac{3}{8}\ \Omega^{-1}$,

dus $R_p = \frac{8}{3}\ \Omega = 2,7\ \Omega$

Dit is een afgerond tussenantwoord. Reken in je rekenmachine door met het onafgeronde antwoord. De parallelschakeling staat in serie met weerstand 1. De totale weerstand is dan: $R_{tot} = R_1 + R_p = 0,33\ \Omega + 2,7\ \Omega = 3,0\ \Omega$

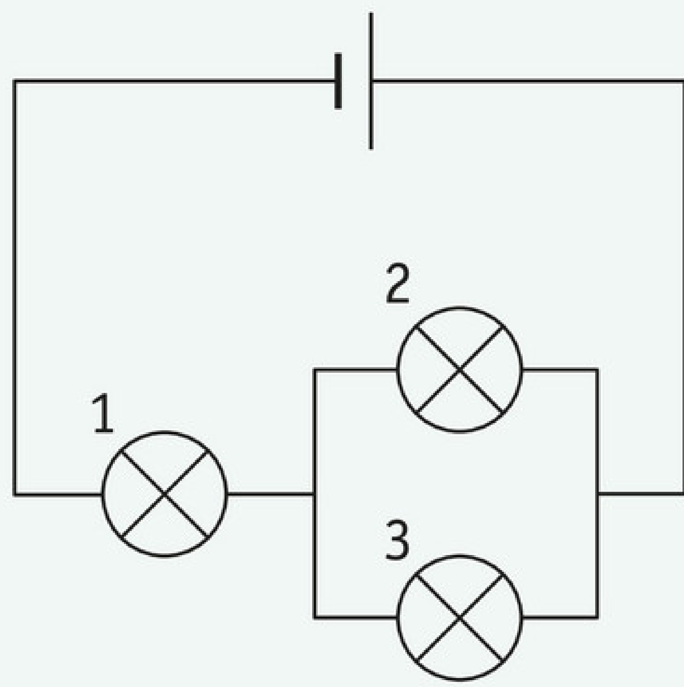
b Uit de formule $R_{tot} = \frac{U_{tot}}{I_{tot}}$ volgt dat de totale stroomsterkte gelijk is aan:

$$I_{tot} = \frac{U_{tot}}{R_{tot}} = \frac{6,0}{3,0} = 2,0\ \text{A}$$

Je kunt met behulp van de eigenschappen van een serie- en parallelschakeling ook *beredeneren* wat er met bijvoorbeeld de totale stroomsterkte gebeurt wanneer er iets in de schakeling verandert. Daarvoor hoef je niet steeds alles precies uit te rekenen. Kijk maar eens naar voorbeeldopgave 7.

Voorbeeldopgave 7

Bekijk de schakeling in figuur 27 met drie identieke gloeilampjes. De spanning over de lampjes is laag, zodat ze zich als ohmse weerstand gedragen. Hun weerstanden zijn dus gelijk aan elkaar.



▲ **figuur 27** drie lampjes, aangesloten op een spanningsbron

Beredeneer wat er in de volgende gevallen gebeurt.
a Lampje 1 wordt losgedraaid.
b Lampje 3 wordt losgedraaid.
c Er wordt een lampje parallel aan lampje 1 geplaatst.
d Er wordt een lampje parallel aan lampje 2 en 3 geplaatst.

De bronspanning blijft in alle gevallen gelijk.

Uitwerking
a Wanneer lampje 1 wordt losgedraaid, wordt de stroomkring onderbroken en gaan alle lampjes uit.
b Wanneer lampje 3 wordt losgedraaid, gaat alle stroom door lampje 2. De geleidbaarheid van de parallelschakeling neemt daardoor af, de weerstand neemt toe. De totale stroomsterkte neemt dus af. Uit $U = I \cdot R$ volgt dat de spanning over lampje 1 afneemt. Dus een groter deel van de spanning gaat over lampje 2 staan. Dus lampje 2 gaat feller branden, lampje 1 minder fel. De lampjes branden nu even fel.
c Wanneer er een lampje parallel aan lampje 1 wordt geplaatst, neemt de geleiding van dit deel van de schakeling toe en de weerstand af. Er gaat dan minder spanning over lampje 1 staan. Over alle lampjes komt nu evenveel spanning te staan, dus ze branden even fel.
d Wanneer er nog een lampje parallel aan lampje 2 en 3 wordt geplaatst, neemt de geleiding van de parallelschakeling toe en de weerstand af. Er gaat dus minder spanning over dit deel van de schakeling staan. De parallel geschakelde lampjes gaan dus minder fel branden, lampje 1 feller.

Onthoud!

- De totale weerstand van in serie geschakelde componenten is gelijk aan de som van de weerstand van de afzonderlijke componenten: $R_{tot} = R_1 + R_2 + \ldots$
- De geleidbaarheid van parallel geschakelde componenten is gelijk aan de som van de geleidbaarheid van de afzonderlijke componenten: $G_{tot} = G_1 + G_2 + \ldots$
- Uit de geleidbaarheid van parallel geschakelde componenten volgt dat de totale weerstand voldoet aan:

$$\frac{1}{R_{tot}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \ldots$$

- De totale weerstand van een gehele schakeling of van een deel van een schakeling wordt ook wel de vervangingsweerstand genoemd.

Opdrachten

47 Weerstanden toevoegen

Een weerstand is aangesloten op een spanningsbron. Leg uit wat er in de volgende gevallen gebeurt met de geleidbaarheid en de weerstand van een schakeling.

a Je voegt een gelijke weerstand in serie toe aan de eerste weerstand.
b Je voegt een gelijke weerstand parallel toe aan de eerste weerstand.
c Je voegt twee gelijke weerstanden toe aan de eerste weerstand: één parallel en één in serie.

48 Weerstanden in waterkoker

Een waterkoker kun je zien als drie in serie geschakelde weerstanden: een nichromen verwarmingselement dat met twee koperen stroomdraden op het stopcontact is aangesloten. De totale weerstand van de waterkoker is gelijk aan 23 Ω.

a Teken schematisch de drie weerstanden van de waterkoker.
b Leg uit welke van de drie weerstanden het grootste vermogen moet hebben.
c Beredeneer welke van de drie weerstanden de grootste weerstand heeft.
d Maak een schatting voor de diameter en de lengte van de twee stroomdraden.
e Bereken met je antwoord op opdracht d de weerstand van de stroomdraden.
f Bereken hoe groot de weerstand van het verwarmingselement dan moet zijn.
g Bereken het vermogen van de stroomdraden.

49 Geleiding van lampjes

Bekijk de schakelingen in figuur 28.

Beredeneer voor elk van de situaties welke lampjes er zwak of fel branden wanneer de schakelaar open is en wanneer de schakelaar gesloten wordt. Gebruik hierbij de begrippen ‘totale weerstand’ en ‘geleidbaarheid’.

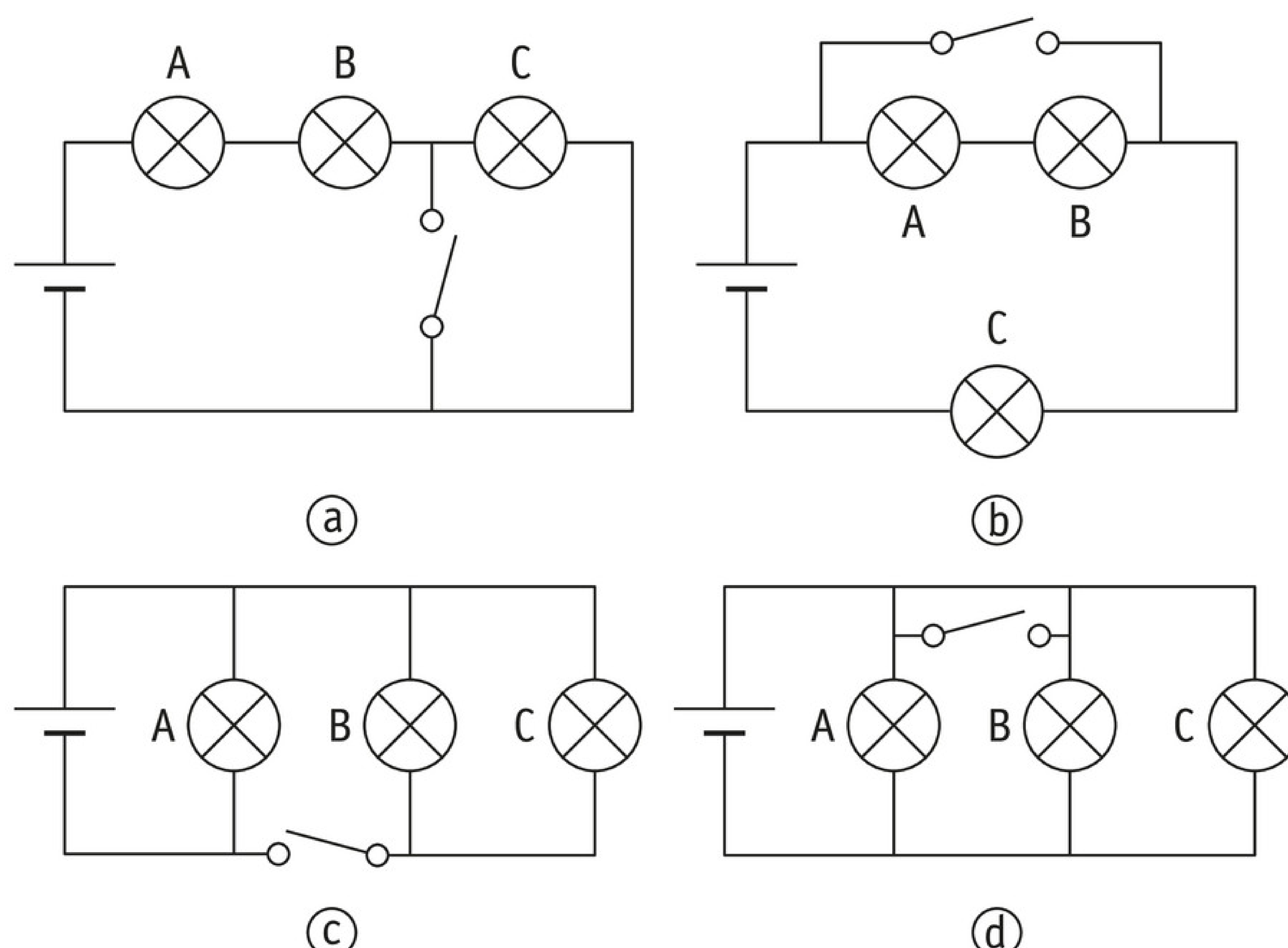
50 Staalwol

Een bolletje staalwol wordt onder spanning gezet (figuur 29). Er gaat een stroom lopen en het bolletje gaat gloeien.

a Leg uit of je het bolletje staalwol kunt zien als serie- of als parallelschakeling.
b Wat betekent je antwoord bij opdracht a voor de totale weerstand van het bolletje?

Je trekt het bolletje staalwol uit elkaar, zodat er een enkele draad ontstaat. Vervolgens zet je deze draad onder dezelfde spanning als hiervoor.

c Leg uit of de staalwol meer of minder zal gaan gloeien.



▲ **figuur 28** vier schakelingen met een schakelaar



▲ **figuur 29** bolletje staalwol

51 Meetapparatuur

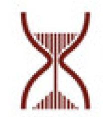
Een ideale spannings- of stroommeter mag de spanning en stroom van een stroomkring niet beïnvloeden.

a Hoe moet je een spanningsmeter aansluiten?

b Moet een spanningsmeter een kleine of juist grote weerstand hebben? Gebruik het begrip 'totale weerstand' in je antwoord.

c Hoe moet je een stroommeter aansluiten?

d Moet een stroommeter een kleine of juist een grote weerstand hebben? Gebruik het begrip 'totale weerstand' in je antwoord.



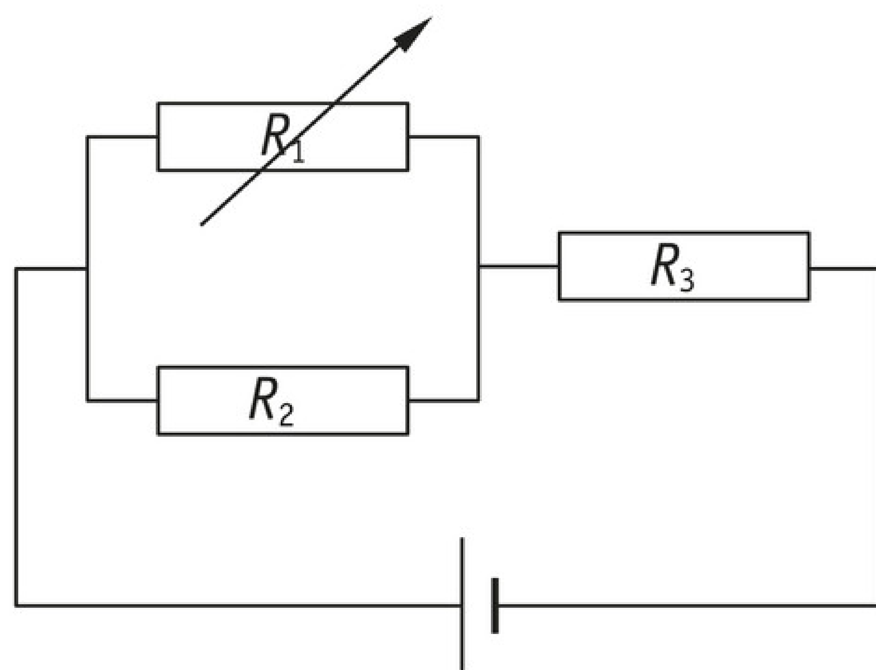
52 Weerstand veranderen

Drie weerstanden zijn opgenomen in de schakeling zoals weergegeven in figuur 30.

a Zoek in Binas op wat de betekenis is van het symbool van een weerstand met een pijl erdoorheen.

Van weerstand R_1 wordt de weerstandswaarde groter gemaakt.

b Leg uit wat er gebeurt met de stroomsterkten I_2 en I_3 door de weerstanden R_2 en R_3.

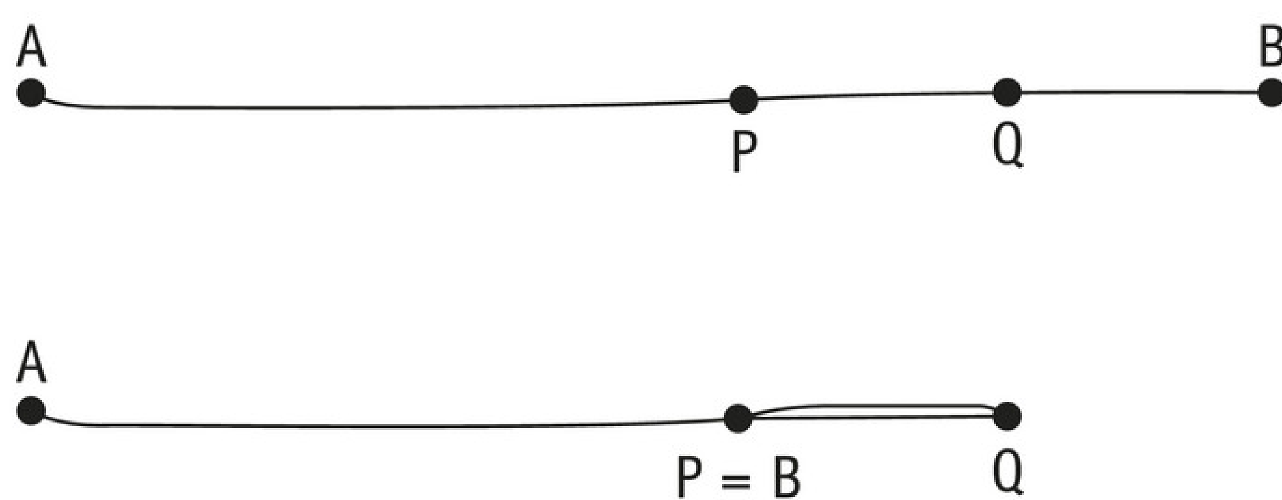


▲ **figuur 30** schakeling met drie weerstanden



+53 Dubbelklappen

Een homogene metalen draad AB met een lengte van 1,20 m heeft een elektrische weerstand van 5,0 Ω (figuur 31). P is een willekeurig op de draad gelegen punt. Q ligt precies tussen de punten P en B in. De draad wordt nu gedeeltelijk dubbelgeslagen, waarbij B met P in contact wordt gebracht. De weerstand tussen A en Q blijkt nu 4,0 Ω te zijn.



▲ **figuur 31** een draad die wordt dubbelgeslagen

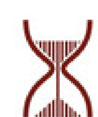
a Teken het schakelschema voor de dubbelgeslagen draad.

b Noem de weerstand tussen punten A en P R_{AP}. Druk de weerstand van een enkele draad tussen P en Q uit in de totale weerstand van de draad en R_{AP}.

c Druk de weerstand van de dubbelgeslagen draad uit in R_{AP} en de totale weerstand van de draad.

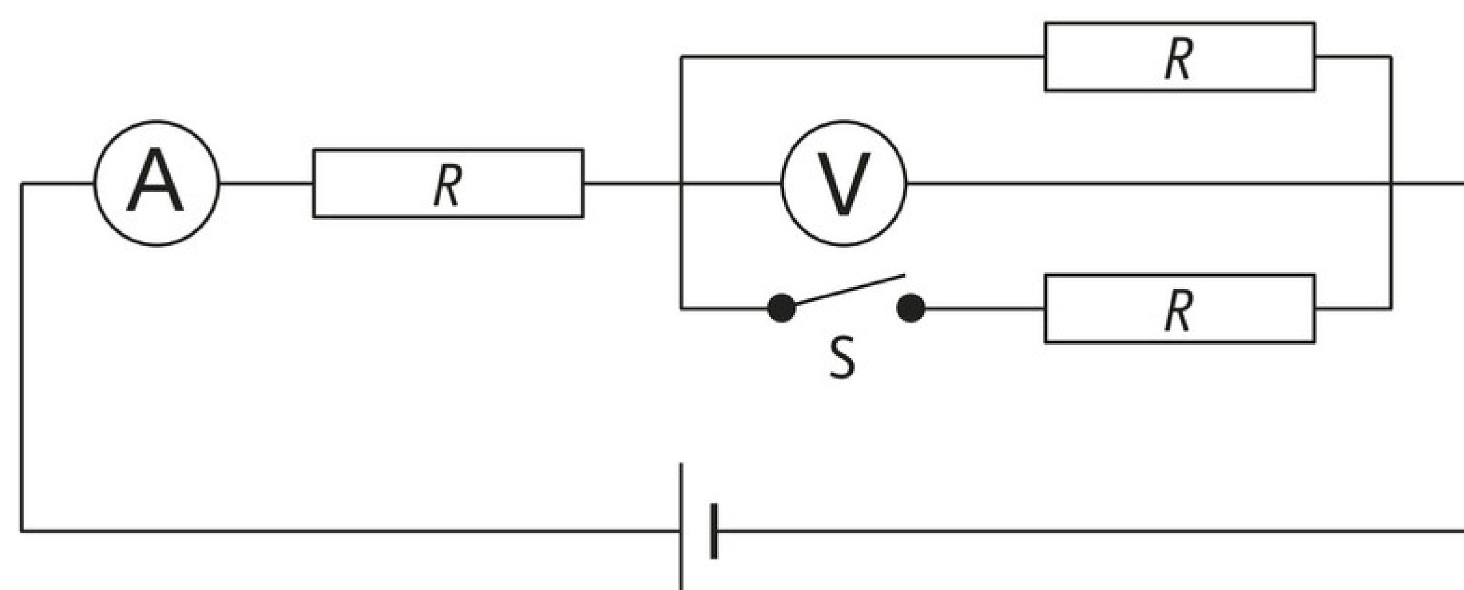
d Bereken hoe groot de weerstand R_{AP} is.

e Bereken de afstand tussen de punten A en P.



54 Schakelaar sluiten

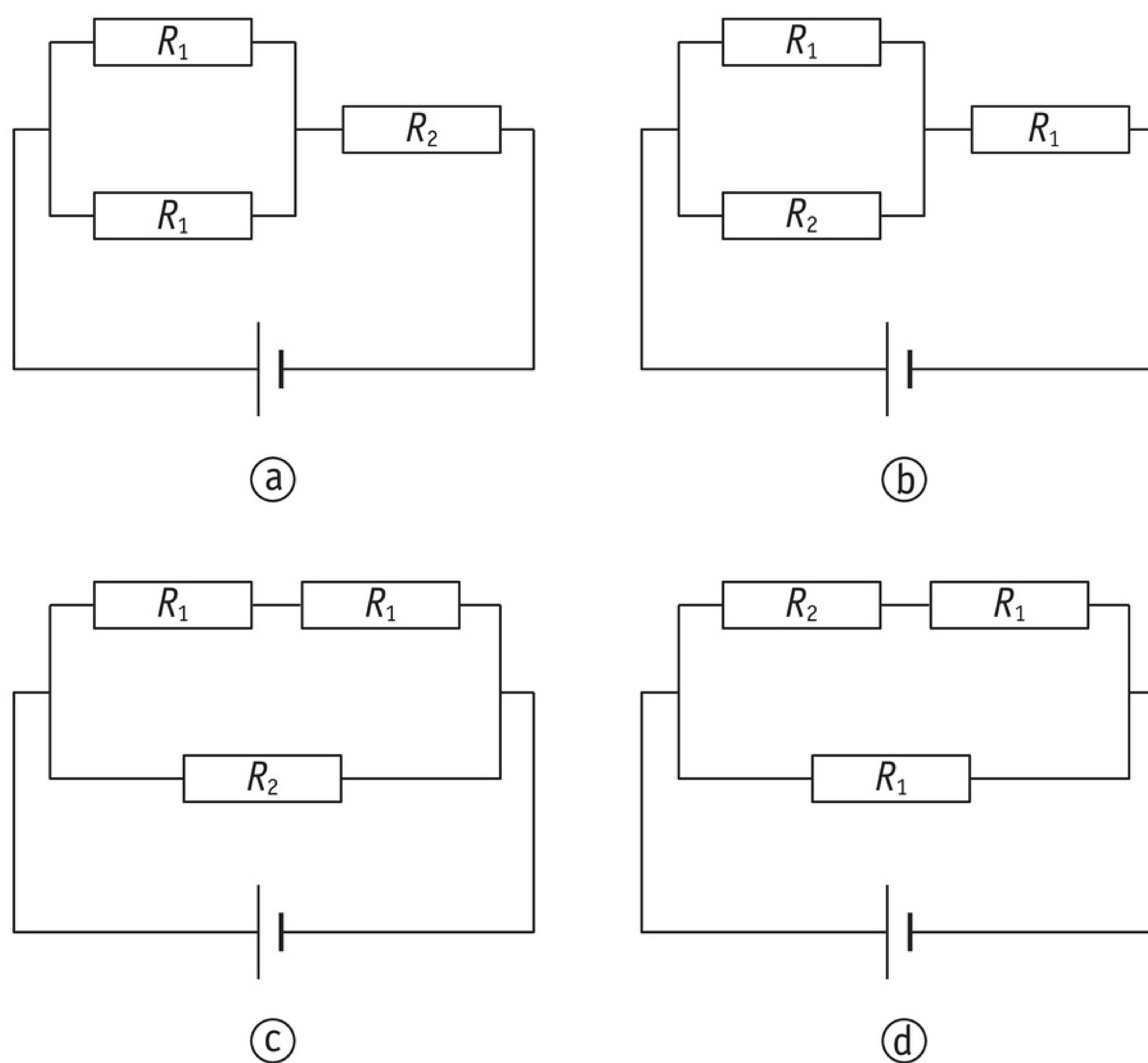
Drie gelijke weerstanden en een ideale spannings- en stroommeter zijn opgenomen in een schakeling (figuur 32).
Beredeneer wat er met de aanwijzing op beide meters gebeurt wanneer de schakelaar wordt gesloten.



▲ **figuur 32** schakeling met drie identieke weerstanden

55 Grootste vermogen

Bekijk de schakelingen in figuur 33. Weerstand R_2 heeft een 2× zo grote weerstandswaarde als weerstand R_1.
Beredeneer in welke van de schakelingen het (elektrisch) vermogen het grootst is.

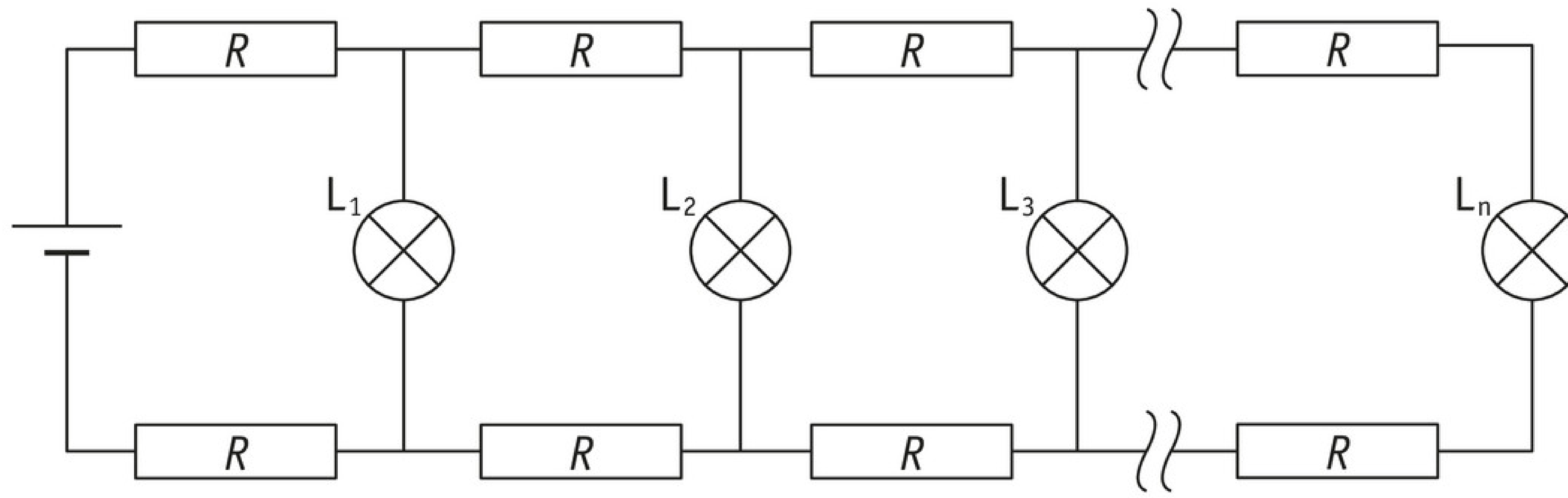


▲ **figuur 33** vier schakelingen

+56 Lampjeslint

In figuur 34 zie je de schakeling van een lint van *n* identieke, parallel aangesloten lampjes, elk met weerstand *R*. De draden waarmee de lampjes op de spanningsbron zijn aangesloten, hebben zelf ook een weerstand *R*.

a Leg uit dat de andere lampjes blijven branden wanneer één van de lampjes doorbrandt.
b Beredeneer of alle lampjes even fel branden. Indien ze niet even fel branden: welk lampje brandt het felst?
c Door welke weerstand gaat de grootste stroom?



▲ **figuur 34** een lint van lampjes

Stel dat je nog een lampje parallel aansluit, op eenzelfde manier als waarop de andere lampjes zijn aangesloten.

d Leg uit dat de drie componenten die je aansluit (twee weerstanden en een lampje) onderling in serie zijn geschakeld en gezamenlijk parallel staan over het laatste lampje.

Om de totale weerstand van de nieuwe schakeling uit te rekenen, is het niet juist om uit te gaan van de weerstand van de schakeling uit figuur 34.

e Leg dit uit door je antwoord bij opdracht d te gebruiken.

f Beredeneer wat er met de totale weerstand zal gebeuren als je het extra lampje erop aansluit.

g Stel dat je het lint oneindig lang maakt. Beredeneer wat er dan gebeurt met de totale weerstand.

h Hoe veranderen je antwoorden bij opdracht b, c, f en g wanneer de draadjes tussen de lampjes geen weerstand zouden hebben?

6 Systemen met speciale componenten

In deze paragraaf leer je:
- welke componenten nog meer voorkomen in schakelingen, behalve weerstanden;
- hoe halfgeleiders worden toegepast;
- welke veiligheidsmaatregelen in elektrische systemen zijn ingebouwd.

Niet alleen metalen geleiden elektrische stroom. Op halfgeleidende materialen is een hele industrie gebaseerd. Chips in bijvoorbeeld telefoons en computers zijn de belangrijkste toepassing. Er worden ook temperatuur- en lichtsensoren van gemaakt.

Metalen

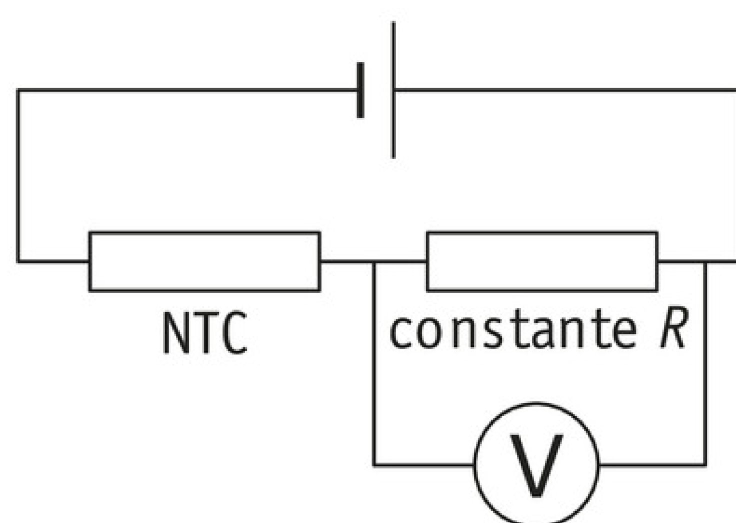
Als je een spanning aanlegt tussen twee uiteinden van een metaaldraad, gaan de geleidingselektronen bewegen. Doordat de elektronen tussen onzuiverheden en trillende atomen van het metaalrooster door moeten, heeft een metaaldraadje een weerstand. Als de temperatuur hoger wordt, trillen de atomen heviger. Er is dan een grotere kans dat een elektron gehinderd wordt. In het algemeen wordt de weerstand hoger als de temperatuur toeneemt. Een draad gemaakt van zo'n metaal noem je een **PTC**, een element met Positieve Temperatuur Coëfficiënt. Elke gewone metaaldraad vertoont dit gedrag.

Halfgeleiders

In halfgeleiders is iets anders aan de hand. Deze stoffen zijn eigenlijk isolatoren. Als het heel koud is, blijven de elektronen bij hun eigen atoom. Er zijn geen geleidingselektronen. Maar de elektronen zitten niet heel erg vast, een klein beetje energie is genoeg om ze los te maken en er geleidingselektronen van te maken. Als de temperatuur hoger wordt, komen er meer elektronen los. Die gaan bijdragen aan de geleiding.
Voor elk elektron dat eenmaal los is, geldt net als bij metalen dat het bij een hogere temperatuur moeilijker wordt door het rooster van steeds heviger trillende atomen te komen. Wat dat betreft neemt de weerstand toe als de temperatuur toeneemt. Maar dit wordt tenietgedaan door het effect van het toenemende aantal geleidingselektronen bij een hogere temperatuur. Al met al neemt de weerstand sterk *af* als de temperatuur toeneemt. Een halfgeleider is een **NTC**, een materiaal met een Negatieve Temperatuur Coëfficiënt.
Ook de energie van licht kan in halfgeleiders extra elektronen vrijmaken. De weerstand van zo'n materiaal neemt af als je er licht op laat vallen. Een **LDR**, een *Light Dependent Resistor*, ofwel lichtgevoelige weerstand, is dus een stukje halfgeleidend materiaal.

Toepassing van NTC en LDR

In veel apparaten wordt de temperatuur gemeten en in een computergeheugen opgeslagen zonder dat iemand voortdurend op een thermometer kijkt en de gegevens intikt. Denk maar aan een weerstation of een couveuse. In deze apparaten wordt een NTC gebruikt om een temperatuurregistratie om te zetten in een elektrische spanning. Elektrische spanningen vormen het signaal dat naar de computer gaat. Zo'n temperatuursensor bestaat uit een serieschakeling van een NTC en een gewone weerstand (figuur 35).



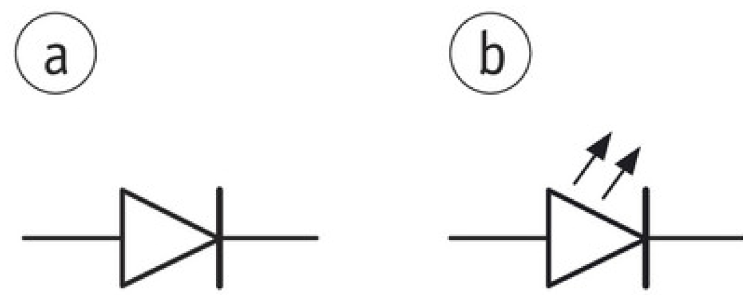
▲ **figuur 35** temperatuursensor

Over de hele schakeling wordt een constante spanning van bijvoorbeeld 5,0 V gezet. Er loopt een kleine stroom. De spanning over de vaste weerstand heeft een bepaalde waarde. Als de temperatuur toeneemt, dan neemt de weerstand van de NTC af. De andere weerstand blijft gelijk. De totale weerstand neemt dus af. Omdat de totale spanning gelijk blijft, neemt de stroomsterkte toe. De spanning over de vaste weerstand is gelijk aan $U = I \cdot R$. Deze neemt toe. Dit is de waarde die de sensor afgeeft. Hoe hoger de temperatuur, hoe hoger deze waarde. Zo wordt de totale spanning van 5,0 V anders verdeeld als de temperatuur verandert.
Als je de NTC vervangt door een LDR heb je een lichtsensor: de spanning over de vaste weerstand neemt toe als de hoeveelheid licht die op de LDR valt toeneemt. Zulke sensoren zorgen er bijvoorbeeld voor dat het licht in een lokaal automatisch wordt gedimd als er genoeg licht van buiten komt.

Diode en led

Hoe goed een halfgeleider geleidt, kan worden beïnvloed door kleine hoeveelheden andere stoffen door het materiaal te mengen. Als het hoofdbestanddeel bijvoorbeeld silicium is, dan verandert een minieme hoeveelheid fosfor de geleidbaarheid enorm. Deze manipuleerbaarheid van halfgeleiders zorgt ervoor dat er veel toepassingen van zijn. Op het principe van die manipuleerbaarheid is de hele chipindustrie gebaseerd.
De **diode** is een belangrijk voorbeeld van een bijzondere halfgeleidercomponent. In een diode zijn twee verschillende stukjes halfgeleider op elkaar geplakt. Het resultaat is dat de diode in

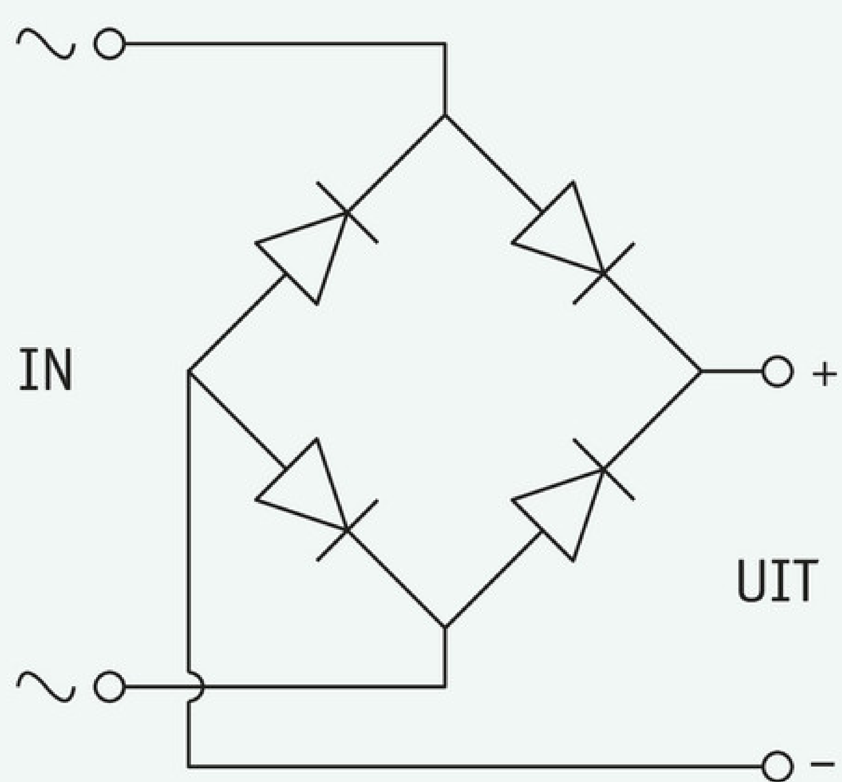
één richting wel stroom doorlaat en in de andere richting niet. De twee richtingen noem je de doorlaatrichting en de sperrichting. Het ‘di’ in diode betekent ‘twee’: deze component heeft twee kanten en gedraagt zich verschillend in de twee mogelijke richtingen waarin een stroom kan lopen.
Het symbool voor diode kun je lezen als een pijltje (figuur 36a). In de richting van de pijl laat de diode de stroom (van plus naar min) door, tegen de pijl in niet. Dioden die licht geven als er stroom doorheen gaat heten **leds** (*Light Emitting Diode*; figuur 36b).



▲ **figuur 36** het symbool voor een diode (a) en een led (b)

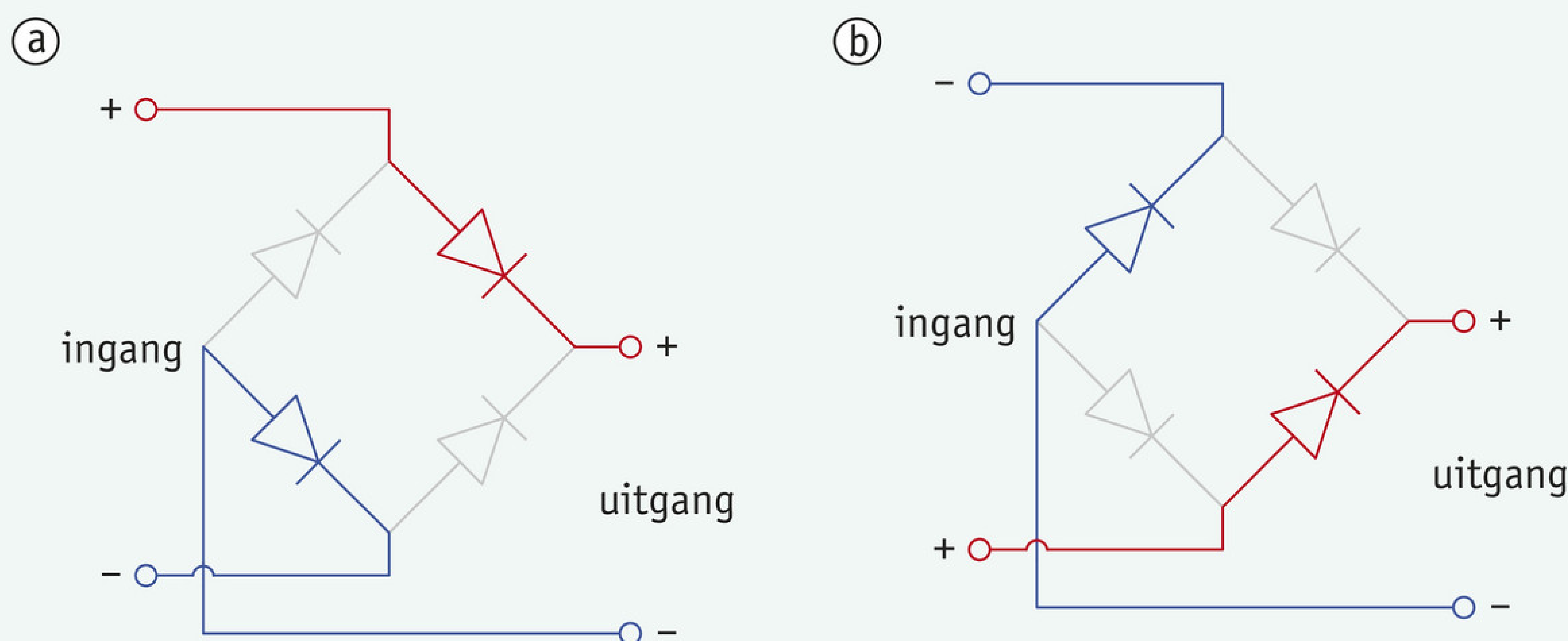
Redeneervoorbeeld

Soms heb je een wisselspanningsbron en is het nodig die wisselspanning om te zetten in een gelijkspanning.
Leg uit dat je dit kunt realiseren met behulp van de schakeling van figuur 37. Dit is een voorbeeld van een Graetzschakeling.



▲ **figuur 37** een schakeling met vier dioden

Uitwerking
Op momenten dat bij de ingang (aan de linkerkant van de schakeling) de bovenkant de pluspool is, heeft de diode rechtsboven geen weerstand en is de bovenste aansluiting van de wisselspanning direct verbonden met het bovenste punt van de uitgang. Die is dus op dat moment de pluspool van de uitgang (figuur 38a).



▲ **figuur 38** de schakeling met vier dioden bij de twee fasen van wisselspanning: met de pluspool aan de bovenkant (a) en aan de onderkant (b)

Gedurende de andere helft van de periode is de onderste aansluiting van de ingang de pluspool. Op dat moment geleidt de diode rechtsonder heel goed en is de bovenste pool van de uitgang opnieuw direct verbonden met de plus van de ingang (figuur 38b). Het punt rechtsboven is dus *altijd* de plus van de uitgang. Op analoge manier beredeneer je dat het punt rechtsonder altijd de min van de uitgang is.

Aardlekschakelaar en zekering

Behalve de componenten waarmee je grip krijgt op de temperatuur, de lichtsterkte en de richting waarin de stroom loopt, zijn er twee componenten die zijn bedoeld voor de veiligheid.
De **zekering** is opgenomen in serie met de hoofdleiding van een groep in de elektrakast. In een groep zijn de apparaten parallel geschakeld. Als er meer en meer apparaten worden aangesloten, neemt de hoofdstroom toe. Dit kan niet oneindig doorgaan. Als je bijvoorbeeld steeds nieuwe stekkerdozen aansluit op andere stekkerdozen ontstaat een te grote hoofdstroom, waardoor draden te heet worden en brand kan ontstaan. Om dat te voorkomen slaat de zekering door als de stroom door de zekering te groot wordt. Vaak is de grenswaarde $I = 16$ A.
De **aardlekschakelaar** meet of er evenveel stroom de schakeling in gaat als eruit komt. Als dat niet zo is, lekt ergens stroom weg naar de aarde, misschien wel via het lichaam van een persoon. Dit is gevaarlijk, ook als de stroom door die persoon veel en veel kleiner is dan de stroomsterkte waarbij de zekering doorslaat. De aardlekschakelaar schakelt binnen milliseconden de spanning uit als er een verschil van 30 mA is tussen de stroom die een groep in gaat en de stroom die terugkomt.

Onthoud!

- Gewone metalen zijn PTC-weerstanden: ze hebben een Positieve Temperatuur Coëfficiënt, de weerstand wordt groter als de temperatuur stijgt. Halfgeleidende materialen werken als een NTC: ze hebben een Negatieve Temperatuur Coëfficiënt, de weerstand daalt als de temperatuur stijgt.
- Halfgeleidende materialen kunnen dienen als LDR: *Light Dependent Resistor*. De weerstand daalt als er licht op valt.
- Met twee verschillende stukjes halfgeleider kun je een diode maken: een component die in één richting stroom doorlaat, en in de andere richting niet.
- Een zekering schakelt de stroom uit als de stroomsterkte te groot dreigt te worden. Dit voorkomt dat er door overbelasting of kortsluiting brand ontstaat.
- Een aardlekschakelaar schakelt de stroom uit als er stroom weglekt naar de aarde. Dit voorkomt dat er langer dan een paar milliseconden een stroom door een persoon blijft lopen.

Opdrachten

57 Componenten
Noem bij elk van de volgende toepassingen de juiste component. Kies uit *aardlekschakelaar*, *diode*, *Graetzschakeling*, *LDR*, *NTC*, *zekering*.
a Hiervan zitten er vier in een Graetzschakeling.
b Zit in smartphones waarbij de lichtsterkte van het scherm zich aanpast aan de omgeving.
c Zit in de oplader van een telefoon.
d Zit in de thermostaat van een centrale verwarming.
e Als deze illegaal is omzeild, is er brandgevaar.
f Als deze in een oud huis ontbreekt, is er gevaar voor elektrocutie.

58 Zekering

Stel dat je vertrouwt op een zekering van 16 A om de spanning uit te schakelen als er een stroom door een persoon loopt.

a Bereken het vermogen van de spanningsbron, dus de energie die maximaal per seconde in het lichaam van de persoon wordt omgezet.

b Leg uit welk ander element ervoor zorgt dat een persoon toch geen gevaar loopt.

59 Diode in serieschakeling

Je schakelt een diode in serie met een weerstand van 100 Ω. Over de serieschakeling zet je een wisselspanning met een amplitude van 4,5 V en een frequentie van 50 Hz. Als er een stroom door de diode loopt, is de spanning over de diode gelijk aan 1,5 V. Je meet de spanning over de weerstand.

a Teken het schakelschema.

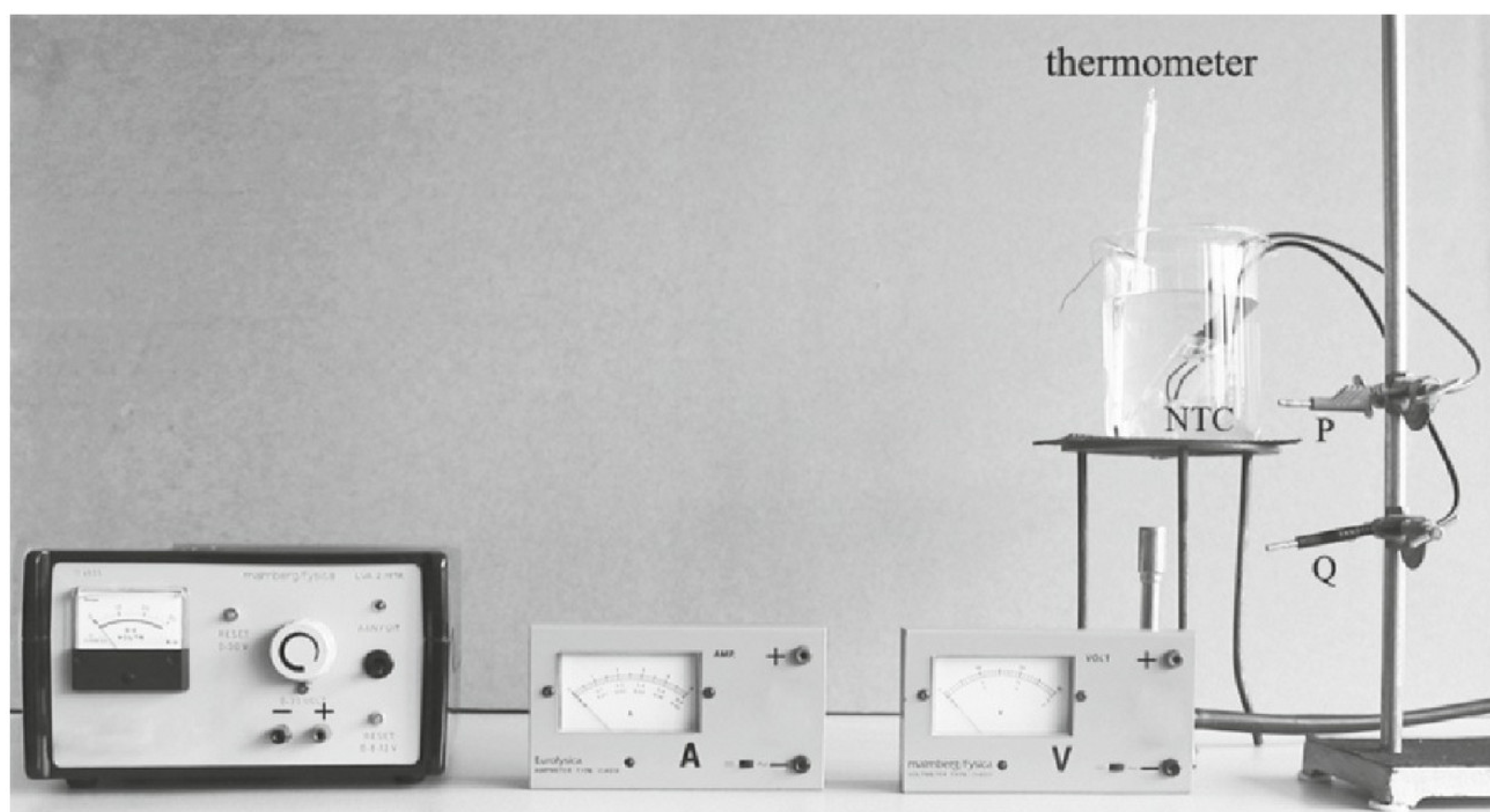
b Teken de grafiek van de stroomsterkte I tegen de tijd t. Laat t lopen van 0 tot 50 ms.

c Teken de grafiek van de gemeten spanning over de weerstand tegen de tijd.

60 Temperatuursensor

Pierre en Diane maken tijdens een practicum een waarschuwingssysteem waarbij een led gaat branden als de temperatuur 20 °C of hoger is (figuur 39). Op de practicumtafel staan de volgende spullen klaar:

- een driepoot met brander en een glas gevuld met water en ijs;
- een NTC en een thermometer die zich in het water bevinden;
- een regelbare spanningsbron, een spannings- en een stroommeter.

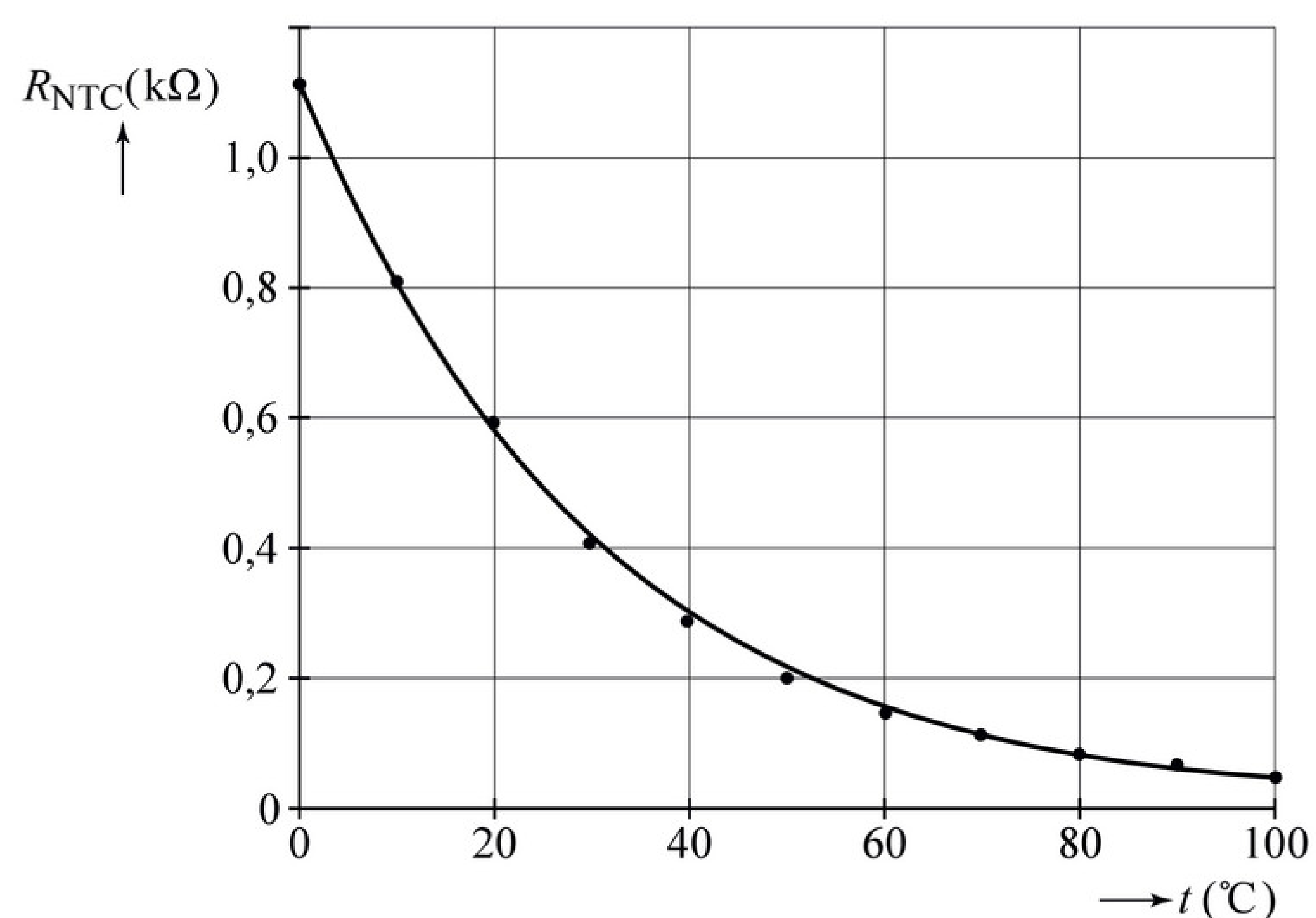


▲ **figuur 39** opstelling van het experiment van Pierre en Diane

Zij willen eerst een grafiek maken van de weerstand van de NTC tegen de temperatuur. Daarvoor moet nog een aantal elektrische verbindingen in de practicumopstelling van figuur 39 gemaakt worden. P en Q zijn de aansluitpunten van de NTC.

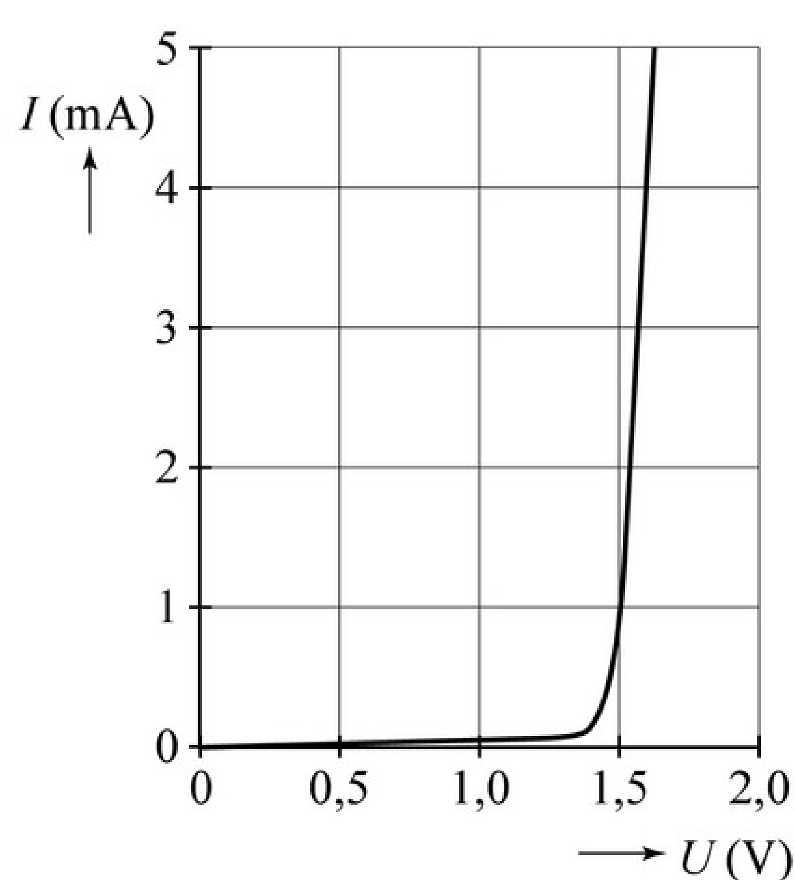
a Teken de figuur schematisch na en teken de draden die nodig zijn om de metingen voor deze grafiek te kunnen uitvoeren.

In figuur 40 zie je de grafiek die Diane en Pierre hebben gemaakt.



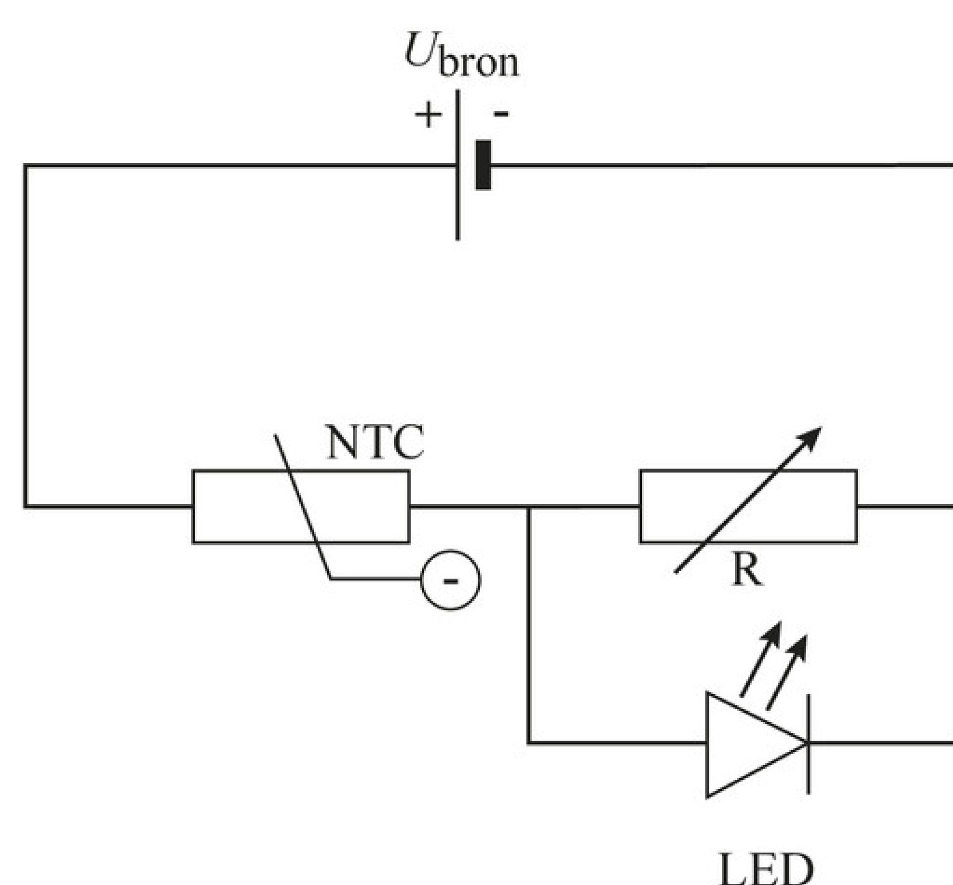
▲ **figuur 40** grafiek van R_{NTC} tegen de temperatuur

Voor het waarschuwingssysteem beschikken zij verder nog over een variabele weerstand en een led. In figuur 41 staat het (I,U)-diagram van de led. De led geeft licht als er een stroom van ten minste 1,0 mA door gaat.



▲ **figuur 41** (I,U)-diagram van de led

Diane en Pierre bouwen de schakeling van figuur 42.



▲ **figuur 42** schakeling voor het waarschuwingssysteem

b Leg aan de hand van figuur 40, 41 en 42 uit dat de led niet brandt bij een lage temperatuur en wel bij een hoge temperatuur.

De variabele weerstand wordt zo ingesteld dat de led licht geeft bij een temperatuur van 20 °C en hoger. De spanning van de spanningsbron is 5,0 V.

c Bepaal de waarde waarop de variabele weerstand wordt ingesteld.

bron: examen 2010-II

61 Modelleer een elektricien

Elektriciens nemen veiligheidsmaatregelen goed in acht. Als ze met hoogspanning werken, hebben ze aan beide handen goed isolerende handschoenen. Ze dragen ook goed isolerende schoenen. Het lichaam geleidt goed. Je stelt een model op voor de stroom die door een persoon loopt, afhankelijk van de weerstand van een hand (huid met of zonder handschoen), het lichaam, en een voet (huid met of zonder isolerende zool).

a Teken het schakelschema dat weergeeft dat de elektricien met elke hand een pool van een spanningsbron raakt.

b Teken het schakelschema als een hand de plus raakt en de grond de minpool is.

62 Ontwerp een buitenlamp

Teken een schakelschema dat ervoor zorgt dat een lamp automatisch aangaat als het donker wordt. Let erop dat het systeem niet concludeert dat het toch nog licht is door het licht van de lamp, want daardoor zou het licht ongecontroleerd gaan knipperen. Geef een uitleg bij je tekening.

Eindopdracht

63 Data binnenhalen

Als je internet gebruikt op je telefoon heb je te maken met meerdere elektrische systemen: in de telefoon zelf en in het datacenter waar de zoekgegevens worden verwerkt. De systemen in het datacenter moeten sterk worden gekoeld, want in de verbindingen ontstaat veel warmte.

a Leg uit of zo'n datacenter bestaat uit veel parallelle schakelingen of uit veel schakelingen in serie. Baseer je antwoord op de geproduceerde hoeveelheid warmte.

Er wordt gewerkt aan verbindingen gebaseerd op grafeen, een nieuw materiaal. Als dat lukt, heb je bij dezelfde stroomsterkte veel minder warmte.

b Leg uit of de soortelijke weerstand van dit materiaal groot of klein zal zijn.

In de kou is het lastig je touchscreen te bedienen, want dat werkt niet met gewone handschoenen. Renée bedenkt dat het nuttig is als de telefoon warmte afgeeft als het buiten koud is. Ze wil de telefoon een temperatuursensor geven en een verwarmingselement. De temperatuursensor bestaat uit een oplaadbare batterij van 7,4 V, aangesloten op een NTC die in serie staat met een gewone weerstand van 10 Ω.

c Leg uit dat over de NTC een grotere spanning staat als het koud is dan als het warm is.

Bij een bepaalde temperatuur loopt er een stroom van 0,10 A door de schakeling.

d Bereken de weerstand die de NTC op dat moment heeft.

Op de oplaadbare batterij staat '2,2 Ah'. De spanning is 7,4 V. Bij een bepaalde stand van het verwarmingselement is de batterij na 2,0 h leeg.

e Bereken het vermogen van de batterij.

De warmte wordt geproduceerd in een koperen draad met een weerstand van 6,7 Ω. Die draad is gewonden als een spiraal en heeft een totale lengte van 2,0 m.

f Bereken de diameter van de draad.

Maak de online diagnostische toets (Test jezelf).

7 Practicum

EXPERIMENT 1 De weerstand van niet-aangesloten apparaten (begripspracticum)

Inleiding
Op apparaten staat vaak het vermogen vermeld. Als een apparaat op het lichtnet werkt, is de spanning bekend en kun je de stroomsterkte door het apparaat berekenen. De weerstand van veel apparaten kun je rechtstreeks meten met een multimeter in de 'ohm-stand', door de twee pennen aan te sluiten op de stekker van het apparaat. Het apparaat werkt dan natuurlijk niet, omdat de stekker niet in het stopcontact zit. Is er een verschil tussen de weerstand die je berekent voor het werkende apparaat en de gemeten weerstand van het niet-aangesloten apparaat?
NB: De manier van meten in dit experiment werkt alleen bij apparaten die geen elektronische componenten hebben die bepalen of er een stroom kan lopen. Het lukt alleen als je ook zonder spanning op het apparaat een knop op 'aan' kunt zetten.

Onderzoeksvraag
Is de weerstand van een apparaat die je bepaalt door het meten van de weerstand tussen de pennen van de stekker gelijk aan de weerstand die je berekent met het vermelde vermogen?

Benodigdheden
strijkbout; waterkoker; bureaulamp met gloeilamp; multimeter

Veiligheid
Voer de metingen uit wanneer de apparaten NIET zijn aangesloten op het stopcontact.

Uitvoering
- Neem een apparaat en zet de aan/uit-knop op 'aan'. Let op: sluit het apparaat niet aan op een stopcontact!
- Sluit de multimeter aan op de pennen van de stekker.
- Noteer de weerstand.
- Noteer ook het vermogen van het apparaat.
- Herhaal dit voor alle apparaten.

Verwerking

1 Bereken uit het vermogen en de spanning van het lichtnet de weerstand van elk apparaat.
2 Vergelijk de gemeten en de berekende waarden.
3 Waarschijnlijk is het verschil het grootst bij de gloeilamp. Kun je dat verklaren?

Conclusie
4 Beantwoord de onderzoeksvraag.

EXPERIMENT 2 Het materiaal van een metalen draad bepalen (onderzoekspracticum)

Inleiding
In dit experiment oefen je met wat je hebt geleerd over de weerstand van metalen draden. Door het meten van de weerstand van een metalen draad kun je de soortelijke weerstand bepalen en daarmee het materiaal waar de draad van gemaakt is.

Onderzoeksvraag
Van welk materiaal is een gegeven metalen draad gemaakt?

Benodigdheden
schuifmaat; meetlint of rolmaat; ohmse weerstand ($\approx 10\ \Omega$); (variabele) spanningsbron; spanningsmeter of multimeter; stroommeter of multimeter; aansluitdraden; krokodillenklemmen

Uitvoering
- Meet de lengte van de draad.
- Meet de diameter van de draad.
- Sluit de metalen draad en de ohmse weerstand in serie aan op de spanningsbron.
- Sluit op de juiste wijze de spanningsmeter en stroommeter aan.
- Meet bij verschillende spanningen van de spanningsbron de spanning over, en de stroomsterkte door de draad. Zorg dat het vermogen in de draad niet meer is dan ongeveer 1,0 W. Noteer de meetgegevens in een tabel.

Verwerking

1 Zet de meetgegevens uit in een (U,I)-diagram (dus met de spanning langs de y-as). Welk verband verwacht je te vinden? Teken de grafiek voor dit verband door de meetpunten.
2 Leg uit dat het hellingsgetal van de grafiek gelijk is aan de weerstand van de draad. Bepaal vervolgens deze helling.
3 Reken de diameter van de draad om in de doorsnede van de draad in m^2.
4 Druk de soortelijke weerstand van een draad uit in de weerstand R, de lengte l en de doorsnede A van de draad.
5 Vul de meetgegevens in in de uitdrukking voor de soortelijke weerstand en reken hiermee de soortelijke weerstand van de draad uit in $\Omega\,m$.
6 Welke aanvullende meting zou je uit kunnen voeren om te controleren of je het juiste materiaal hebt gevonden?

Conclusie
7 Beantwoord de onderzoeksvraag (gebruik Binas).

EXPERIMENT 3 De vervangingsweerstand van serie- en parallelschakelingen (begripspracticum)

Inleiding
De totale weerstand van een schakeling kun je bepalen door de totale stroom en spanning van de schakeling te meten en de formule $R = \frac{U}{I}$ te gebruiken. De totale weerstand kun je ook direct berekenen op basis van de weerstand van de aangesloten componenten.

Onderzoeksvraag
Hoe hangt de totale weerstand af van de manier waarop weerstanden zijn geschakeld (in serie of parallel)?

Benodigdheden
vier verschillende ohmse weerstanden; aansluitdraden; spanningsmeter of multimeter; stroommeter of multimeter; (variabele) spanningsbron

Veiligheid
Let er bij de uitvoering op dat het totale vermogen van de spanningsbron niet hoger wordt dan het maximale vermogen van de ohmse weerstanden.

Uitvoering
- Sluit achtereenvolgens twee, drie en vier ohmse weerstanden in serie aan op de spanningsbron. Noteer voor elke schakeling de weerstand van de aangesloten weerstanden. Meet voor elke schakeling de totale spanning en stroom.
- Herhaal de vorige handeling, maar sluit de weerstanden nu parallel aan.
- Verzin een gemengde schakeling met vier ohmse weerstanden. Laat een klasgenoot de metingen uitvoeren om de totale weerstand te bepalen.

Verwerking

1 Bereken voor elke schakeling de totale weerstand.
2 Welk verband kun je voor een serieschakeling ontdekken tussen de totale weerstand en de afzonderlijke weerstanden?
3 Bereken voor de parallelschakeling de geleidbaarheid ($G = \frac{1}{R}$) van de afzonderlijke componenten en de totale geleidbaarheid.
4 Welk verband kun je voor de parallelschakeling ontdekken tussen de totale geleidbaarheid en de geleidbaarheid van de afzonderlijke componenten?
5 Bepaal de totale weerstand van de gemengde schakeling. Controleer dit antwoord door ook de totale weerstand uit te rekenen met behulp van de formules voor de totale weerstand.

Conclusie
6 Beantwoord de onderzoeksvraag.

Je docent beslist of je de volgende experimenten uitvoert volgens de instructies of dat je de uitgebreide omschrijving krijgt.

EXPERIMENT 4 Vermogen meten (apparatuurpractium)

Inleiding
Het vermogen van elektrische apparaten kun je meten door de spanning over en stroom door het apparaat te meten. Het vermogen volgt dan uit de formule: $P = U \cdot I$. In dit experiment bepaal je van verschillende fietslampjes het vermogen. Je frist hiermee ook je kennis op over het meten van spanning en stroom in een stroomkring.

Onderzoeksvraag
Hoe groot is het vermogen van verschillende fietslampjes?

EXPERIMENT 5 De weerstand van een metalen draad (begripspracticum)

Inleiding
In dit experiment onderzoek je op welke manier de weerstand van een metalen draad afhangt van de volgende grootheden: de lengte van de draad, de dikte van de draad en het materiaal waarvan de draad is gemaakt.

Onderzoeksvraag
Op welke manier hangt de weerstand van een metalen draad af van de dikte en lengte van de draad en het materiaal waarvan de draad is gemaakt?

ONDERZOEK De weerstand van potloodstrepen

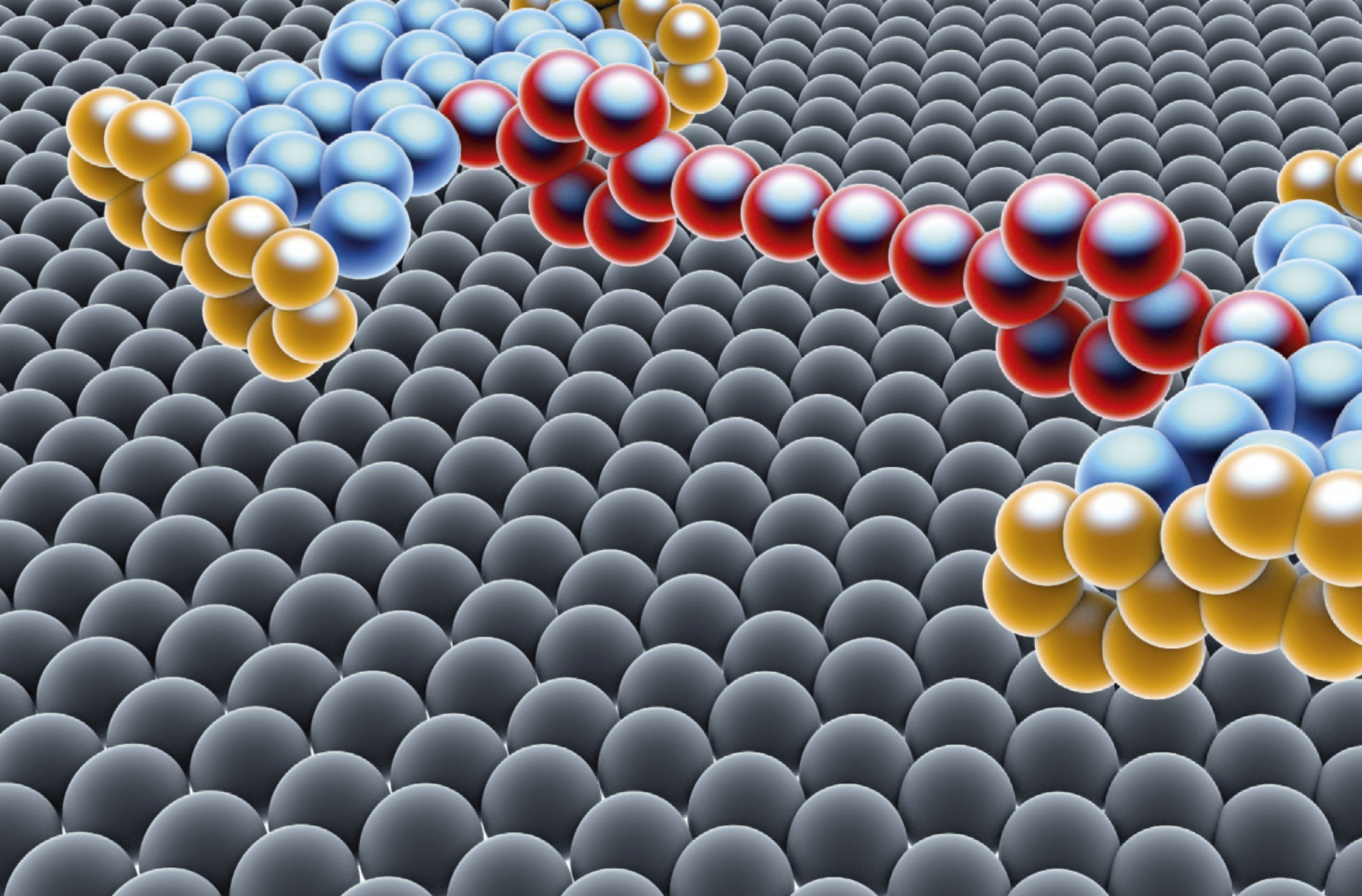
Inleiding
Een potloodstreep geleidt elektrische stroom. Zou de theorie over weerstand die is opgesteld voor stroomdraden ook werken voor dunne, smalle laagjes grafiet? Als deze theorie ook geldig is voor potloodlijnen, dan zal:

- de weerstand groter zijn voor een langere potloodstreep (om precies te zijn zal de weerstand recht evenredig zijn met de lengte van de streep);
- de weerstand omgekeerd evenredig zijn met de breedte van de streep (bij dezelfde lengte en dikte);
- de weerstand omgekeerd evenredig zijn met de dikte van de streep (bij dezelfde lengte en breedte);
- de uitkomst van $\frac{R \cdot A}{l}$ gelijk zijn aan de soortelijke weerstand van grafiet.

Onderzoeksvragen
1. Welke orde van grootte heeft de weerstand van een dikke potloodstreep?
2. Kloppen de metingen met de vier voorspellingen uit de inleiding?
3. Zijn er verschillen tussen H-, B- en HB-potloden?
4. Zijn er verschillen tussen zwarte potloden en kleurpotloden?
5. Kun je uit de metingen de soortelijke weerstand van grafiet bepalen?

Praktisch
De laatste onderzoeksvraag kun je waarschijnlijk alleen wat betreft de orde van grootte beantwoorden. Want om te bepalen hoe dik je laagje is, moet je een schatting maken van het volume dat van je potloodpunt is afgesleten bij het dik opvullen van een lijn van bijvoorbeeld 10 cm lang en 0,5 cm breed, en dat volume is heel klein. Nog een tip bij het interpreteren van de resultaten: stel jezelf de vraag of de stift van een potlood wel uit puur grafiet bestaat.

Conclusie
Beantwoord de onderzoeksvragen.



HOOFDSTUK 5

Biofysica: de natuurkunde van het leven

In dit hoofdstuk worden voorbeelden van biofysisch onderzoek beschreven. Daarbij is gekozen voor de volgorde van grote naar kleine biologische systemen: een organisme, een orgaan, een cel, een organel of zelfs een DNA- of RNA-molecuul. Je krijgt bijvoorbeeld inzicht in de werking van moleculaire motoren in cellen. Fundamenteel onderzoek op dit gebied leverde de Groningse hoogleraar Ben Feringa de Nobelprijs voor Scheikunde op. Naast ontwikkelingen op dit fundamentele niveau zijn er ook spectaculaire praktische toepassingen van biofysica op micro- en macroschaal.

Introductie

Praktijk

Theorie

Maatschappij

Wat weet je al over biofysica?

Leerdoelen
1 Je kunt uitleggen hoe je met een oscilloscoop de trillingstijd kunt bepalen en hoe je met de trillingstijd de frequentie kunt berekenen.
2 Je kunt het zwaartepunt van een voorwerp bepalen.
3 Je kunt berekeningen uitvoern met de formule $Q = I \cdot t$
4 Je kunt berekeningen maken met het verband tussen vermogen, spanning en stroomsterkte.
5 Je kunt op basis van meetgegevens de veerconstante van een veer bepalen.
6 Je kunt het rendement van een apparaat berekenen op basis van energie.

In de vorige leerjaren heb je al een aantal dingen geleerd over onderwerpen die ook horen bij de biofysica. Je hebt deze kennis weer nodig wanneer je aan dit hoofdstuk begint. Wil je snel controleren wat je nog weet? Maak dan de volgende opdrachten.

Opdrachten voorkennis

1 Een hommel maakt met zijn vleugels een brommend geluid. De frequentie van dat geluid is 250 Hz.
Hoelang duurt een volledige trilling van de vleugels?

Een volledige trilling van de vleugels duurt ________ s

2 Dit kuiken heeft een bijzondere eigenschap. Als je het kuiken op zijn kant legt en je laat het los, dan komt het na enig wiebelen weer helemaal recht te staan.



▲ **afbeelding 1**

Waar bevindt het zwaartepunt van het kuiken zich?
☐ Het zwaartepunt van het kuiken bevindt zich helemaal boven in de blauwe kam.
☐ Het zwaartepunt van het kuiken bevindt zich helemaal onder in de rode bol.
☐ Het zwaartepunt van het kuiken bevindt zich precies in het midden van het kuiken.

3 Een ledlamp staat 2,00 uur aan. Door de ledlamp gaat een elektrische stroom van 20,0 mA.
Hoeveel lading is er in die tijd door de ledlamp gestroomd?

In twee uur is ________ C door de ledlamp gestroomd.

4 Op het typeplaatje van een speelgoedautootje staat: 6,0 V / 200 mA.
Bereken het vermogen van het speelgoedautootje.
- ☐ 0,03 W
- ☐ 1,2 W
- ☐ 30 W
- ☐ 1200 W

5 Een onbelaste veer is 5,4 cm lang. Als er een blokje aan hangt, is deze veer 25 cm lang.
De veerconstante is 0,25 N cm^{-1}.
Bereken de massa van het blokje.

De massa van het blokje is ________ kg.

6 Duran gebruikt een dompelaar om 300 mL water te verwarmen. De dompelaar geeft in tien minuten 25 kJ warmte af. Hiervan wordt 20 000 J opgenomen door het water.
Bereken het rendement waarmee het water is verwarmd. Rond af op een geheel getal.

Het rendement is gelijk aan ________ %.

Wil je weten of je voldoende voorkennis hebt voor dit hoofdstuk, maak dan online de *Voorkennistoets*.

Praktijk

Lopen op bionische benen

Onderzoekers ontwikkelen een kunstbeen dat net zo functioneert als een gewoon been. Artsen werken daarbij samen met biomechanici en robotwetenschappers. Hun doel: mensen die een been zijn kwijtgeraakt weer normaal laten staan, lopen en rennen. De resultaten zijn bemoedigend. Er zijn al kunstbenen waarmee je vrijwel natuurlijk en zonder extra inspanning kunt lopen.



Lopen als gecontroleerd vallen

Bij lopen zijn drie zaken van belang: stabiliteit, energieverbruik en wendbaarheid. Mensen lopen heel stabiel, ook over een ondergrond met oneffenheden. De manier waarop ze dat doen, lijkt op een dubbele slingerbeweging. Bij elke stap zwaait het ene been naar voren, met het draaipunt bovenaan bij de heup. Het andere been beweegt ondertussen als een omgekeerde slinger, met het draaipunt onderaan bij de voet.

Vreemd genoeg is het lichaam bij deze manier van lopen vrijwel geen moment in evenwicht. Sterker nog: eigenlijk ben je de hele tijd aan het vallen. Dat merk je als iemand je pootje licht: voor je het weet, lig je op je neus. Al dat vallen leidt niet tot problemen. Zolang je niet struikelt, wordt die valbeweging steeds op het juiste moment afgebroken. Zo nodig voert je lichaam tegelijk een kleine correctie uit, zodat je niet te ver uit balans raakt. Lopen is gecontroleerd vallen.

Die controle is zo goed geautomatiseerd, dat je kunt lopen zonder erbij na te denken. Dat is heel anders als je net een kunstbeen hebt gekregen. Spieren en pezen die je vroeger gebruikte, zijn er niet meer. Bovendien is het gevoel in het getroffen been weg. Het lopen gaat daardoor niet meer vanzelf. Je moet opnieuw leren de valbeweging van je lichaam te controleren. Veel hangt daarbij af van de kwaliteit van het kunstbeen. Hoe beter dat presteert – het liefst als een echt been natuurlijk – des te stabieler en soepeler je loopt.

Een bionisch kunstbeen

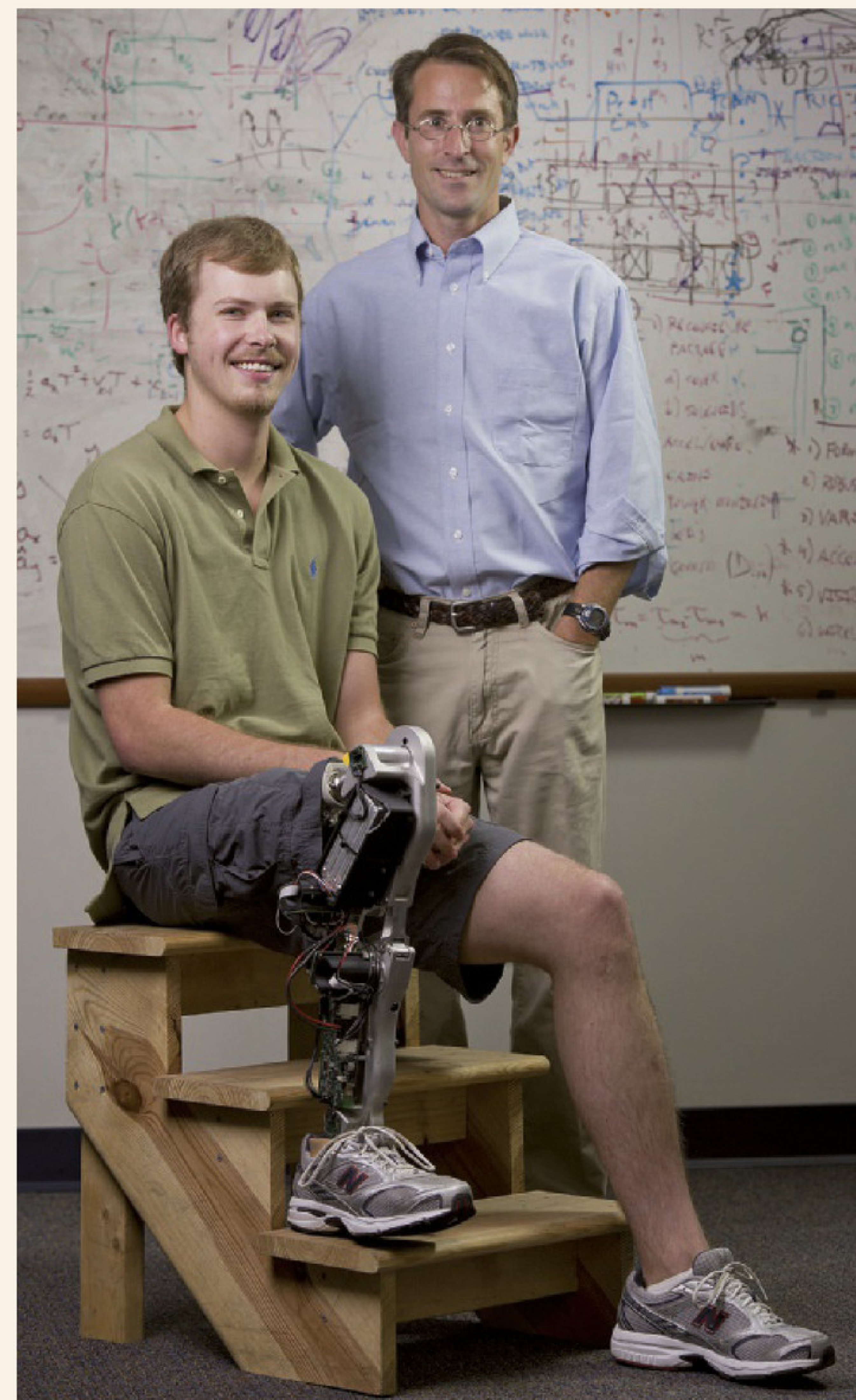
Het bionische been van Craig Hutto (figuur 1) is ontwikkeld door ingenieur Michael Goldfarb van de

"Het been leert van jou wat het moet doen."



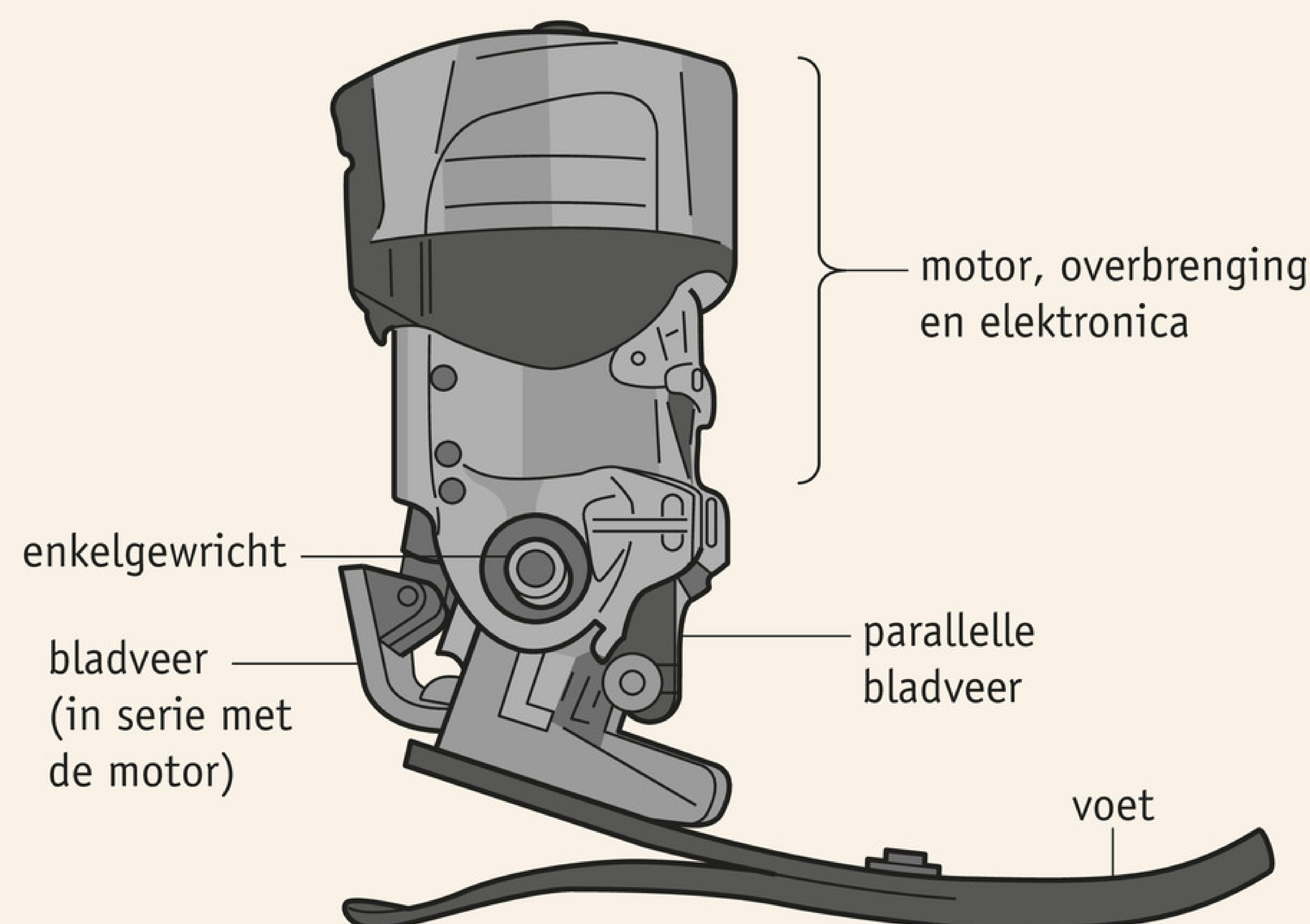
Craig Hutto was zestien jaar toen hij voor de kust van Florida werd aangevallen door een haai. Hij bracht het er levend af, maar werd zwaargewond. Zijn rechterbeen moest vlak boven de knie geamputeerd worden. Nu, zes jaar later, loopt Craig weer bijna normaal, dankzij een experimenteel kunstbeen met actief aangedreven knie- en enkelgewrichten. Craig is enthousiast: "Mijn gewone kunstbeen is altijd een stap te laat, dit been maar een fractie van een seconde! En ik kan weer gewoon een trap op lopen."

▲ **figuur 1** Craig Hutto



▶ **figuur 2** Michael Goldfarb en Craig Hutto

Vanderbilt-universiteit (figuur 2). Goldfarb wilde een kunstbeen maken met superieure prestaties. "De beste kunstbenen die nu te koop zijn, hebben schokdempers als knieën en een bladveer van carbon," zegt hij. "Deze benen kunnen zich niet aanpassen als de gebruiker iets anders wil dan lopen over een vlakke ondergrond. De echte problemen komen wanneer je een helling of een trap probeert op of af te lopen. Conventionele kunstbenen zijn daar niet geschikt voor. Ze zijn erg onstabiel en dus vallen de gebruikers vaak."
Het laboratorium van Goldfarb heeft een batterij-aangedreven kunstbeen ontwikkeld dat zich aanpast aan wat de gebruiker doet. Dat been stelt vast of je een helling op of af loopt en levert daarna de biomechanisch vereiste krachten. "Het been maakt gebruik van de technologie uit smartphones en tablets," zegt Goldfarb. "De microsensoren en accelerometers die een smartphone vertellen wat de stand van het scherm is, gebruiken wij om de stand van het been te bepalen. Niet alleen de oriëntatie in de ruimte, maar ook snelheid, versnelling en draaihoek van elk onderdeel is belangrijk."
Doordat het been niet achter de gebruiker aansleept, maar bij elke stap naar voren zwaait, is de stabiliteit veel beter dan van een passief



▲ **figuur 3** door een elektromotor aangedreven enkelgewricht

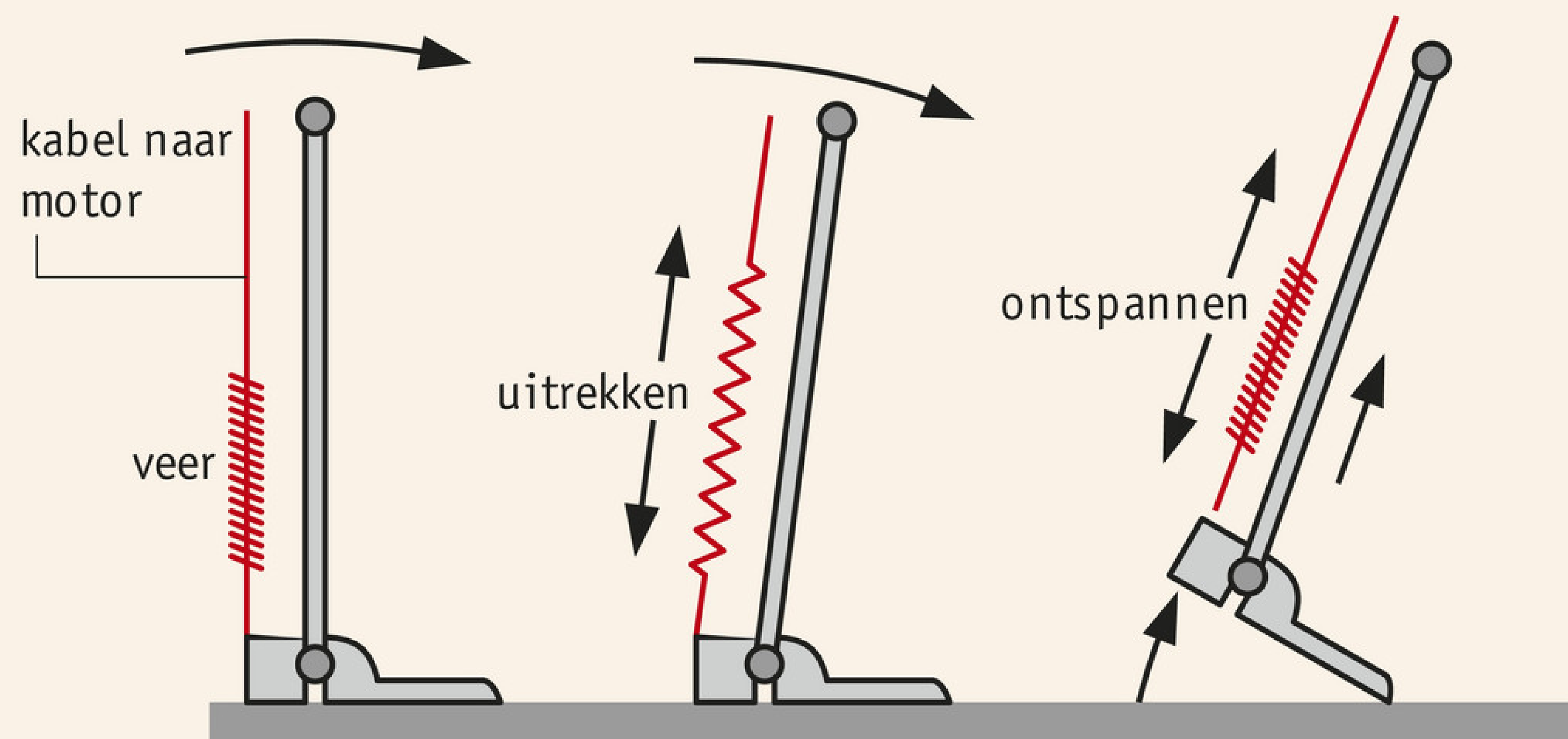
been. De informatie die nodig is om het been aan te sturen, wordt afgeleid uit de beweging van het heupgewricht ten opzichte van het been. “Het besturingssysteem moet snel en betrouwbaar beslissingen nemen,” zegt Goldfarb. “Het heeft veel sensoren en gecompliceerde software, die gebruikt wordt om erachter te komen wat de gebruiker wil doen. Het is te vergelijken met de patroonherkenningssoftware in spraakherkenningsprogramma’s. Het been leert van jou wat het moet doen. Dat is echt revolutionair.”

Energiezuinig(er) lopen

Naast stabiliteit is ook het energieverbruik een belangrijk aspect van lopen. Wetenschappers hebben ontdekt dat de loopsnelheid waaraan mensen de voorkeur geven uit energieoogpunt het meest efficiënt is. De ideale loopsnelheid van een volwassene is zo’n 4,5 km h^{-1}. Het energieverbruik van het lichaam is bij deze snelheid ongeveer 3 J per kilogram lichaamsmassa hoger dan bij rechtop stilstaan. Voor iemand van 60 kg komt dat neer op een extra verbruik van circa 180 J. De extra energie is nodig voor de spieren die bij het lopen in actie komen. Die hebben chemische energie nodig om zich samen te trekken en zo krachten op de benen uit te oefenen. Om op die energie te besparen, maakt het lichaam ook gebruik van de veerkracht in de spieren en de pezen. Dat zie je bijvoorbeeld bij de achillespees in de hiel. Deze pees werkt als een veer die eerst wordt opgerekt (en dan veerenergie opslaat) en dan terugveert (en dan veerenergie teruggeeft). Zo krijgt het lichaam een duwtje mee. Mensen die op een passief (niet-aangedreven) kunstbeen lopen, moeten op een andere manier leren lopen. Dat valt niet mee. Uit onderzoek blijkt dat lopen met een passief kunstbeen erg inspannend is. Mensen van wie een been onder de knie geamputeerd is, lopen gemiddeld 36% langzamer dan mensen met gewone benen. Ze hebben gemiddeld 41% meer energie nodig om een bepaalde afstand af te leggen. Voor mensen van wie een been boven de knie is geamputeerd, zijn de cijfers nog ongunstiger: respectievelijk 43% en 89%. Lopen met een passief kunstbeen is dus duidelijk minder efficiënt dan lopen op twee normale benen.

Een kunstvoet met aandrijving

Het probleem is dat een passief kunstbeen zelf geen krachten kan uitoefenen. Het moet vanuit de knie of de heup naar voren geslingerd worden en dat kost relatief veel energie. Je ziet veel geamputeerden daardoor op een slepende manier lopen. Actieve kunstbenen, zoals het bionische been van Craig Hutto, kunnen zich wel actief afzetten. Dat komt doordat de gewrichten elektrisch worden aangedreven. In figuur 3 zie je een voorbeeld van een aangedreven enkelgewricht. De elektromotor en veren in de kunstvoet hebben dezelfde functie als de spieren en de pezen in het menselijk lichaam. De elektromotor geeft het been op het juiste moment een zetje, net als een spier die zich op het juiste moment samentrekt. De veren werken als pezen: ze slaan veerenergie op als ze uitrekken en geven die energie weer terug als ze zich ontspannen (figuur 4).



▲ **figuur 4** Zo werkt de veer die de functie van achillespees heeft.

Opdrachten

Bestudeer eerst de theorie van dit hoofdstuk voordat je de volgende opdrachten uitvoert.

1 Lopen

Als mensen sneller of langzamer gaan lopen, verandert de stapfrequentie (het aantal stappen per tijdseenheid). Je kunt dit verband gemakkelijk onderzoeken met een loopband, maar met een stopwatch en een meetlint kom je ook een heel eind.

a Bepaal de loopsnelheid v en de stapfrequentie f van enkele proefpersonen bij vier verschillende snelheden. Geef de uitkomsten weer in een grafiek.

Volgens de biofysici Bertram en Ruina wordt het verband tussen v en f bij normaal lopende volwassenen gegeven door $f = c \cdot v^b$, waarin c een constante is en $b = 0{,}58$.

b Laat zien of jouw onderzoeksresultaten met deze formule in overeenstemming zijn.

2 Orthese

Mensen die te weinig spierkracht in hun benen hebben, kunnen gebruikmaken van speciale hulpmiddelen die de werking van de benen ondersteunen. Zo'n hulpmiddel wordt een orthese genoemd.

In figuur 5 zie je een experimentele orthese die veerenergie opslaat en op het juiste moment weer afgeeft. De orthese heeft een mechanisme (*clutch*) dat het bovenste uiteinde van de veer afwisselend vergrendelt en weer vrijgeeft.

a Wanneer wordt het uiteinde van de veer vergrendeld?

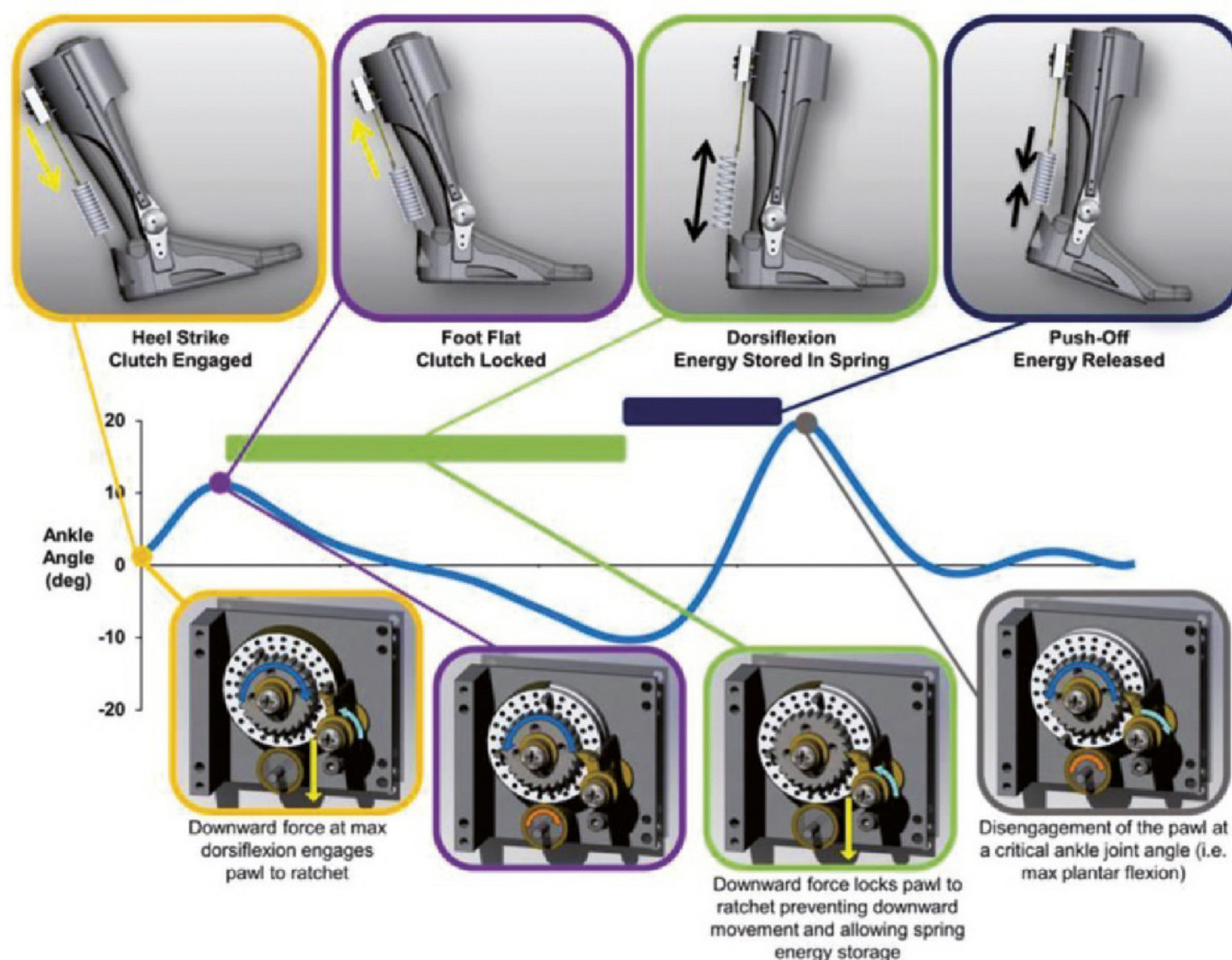
b Leg uit waarom dat juist op dat moment gebeurt.

c Wanneer wordt het uiteinde van de veer weer vrijgegeven?

d Leg uit waarom dat juist op dat moment gebeurt.

Inmiddels wordt gewerkt aan een orthese met een elektromotor op de plaats van het vergrendelingsmechanisme. Zo'n elektromotor (zie het onderste gedeelte van figuur 5) kan de kracht tijdens de afzet groter maken, zonder dat daarvoor iets aan de veer veranderd hoeft te worden.

e Leg uit wat zo'n elektromotor daarvoor tijdens elke fase van de beweging moet doen. De elektromotor kan linksom en rechtsom draaien, vergrendelen en 'in zijn vrij staan'.



▶ **figuur 5** een experimentele orthese

1 Een model voor lopen

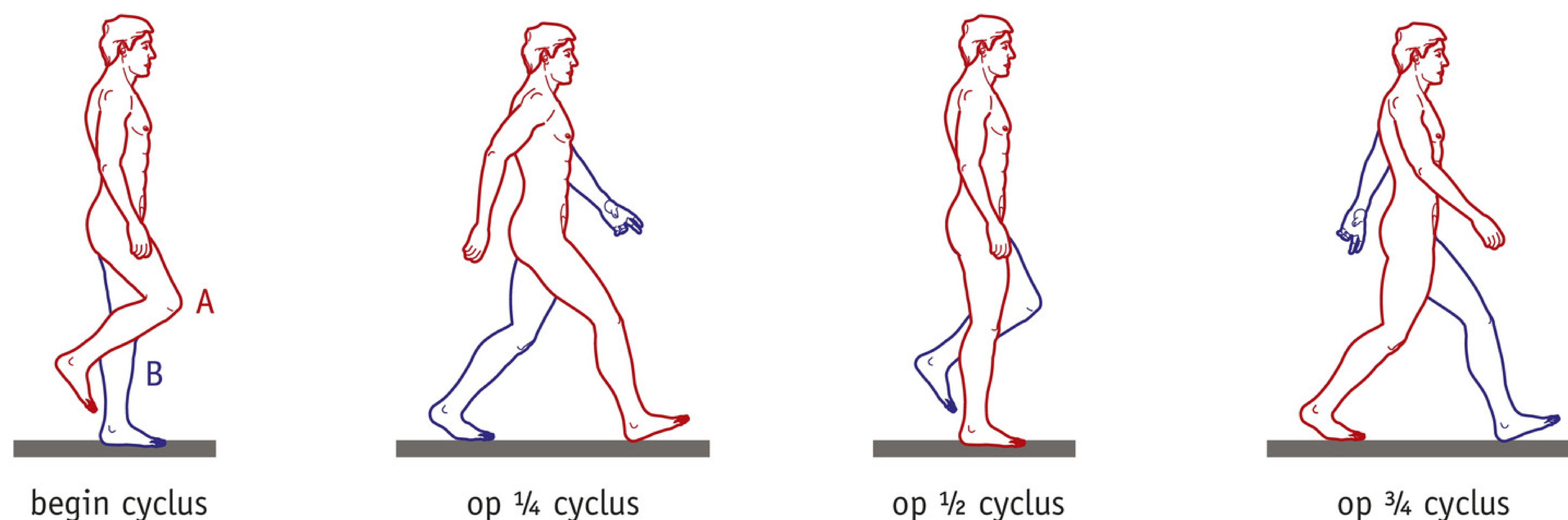
In deze paragraaf leer je:
- hoe de slingerfrequentie van het been en zuinigheid met energie de loopsnelheid bepalen;
- welke factoren bepalen wanneer je overgaat van wandelen op rennen.

Deze paragraaf gaat over de manier waarop mensen en dieren lopen. Er is een verband waarmee je deze bewegingen onder heel uiteenlopende omstandigheden kunt vergelijken.

De loopcyclus

Als je wandelt, herhaal je steeds dezelfde loopcyclus (figuur 1), die bestaat uit vier perioden:
- periode 1: been A zwaait naar voren, been B blijft staan;
- periode 2: been A landt op de grond, terwijl been B zich afzet;
- periode 3 en 4: Als 1 en 2, maar met A en B verwisseld.

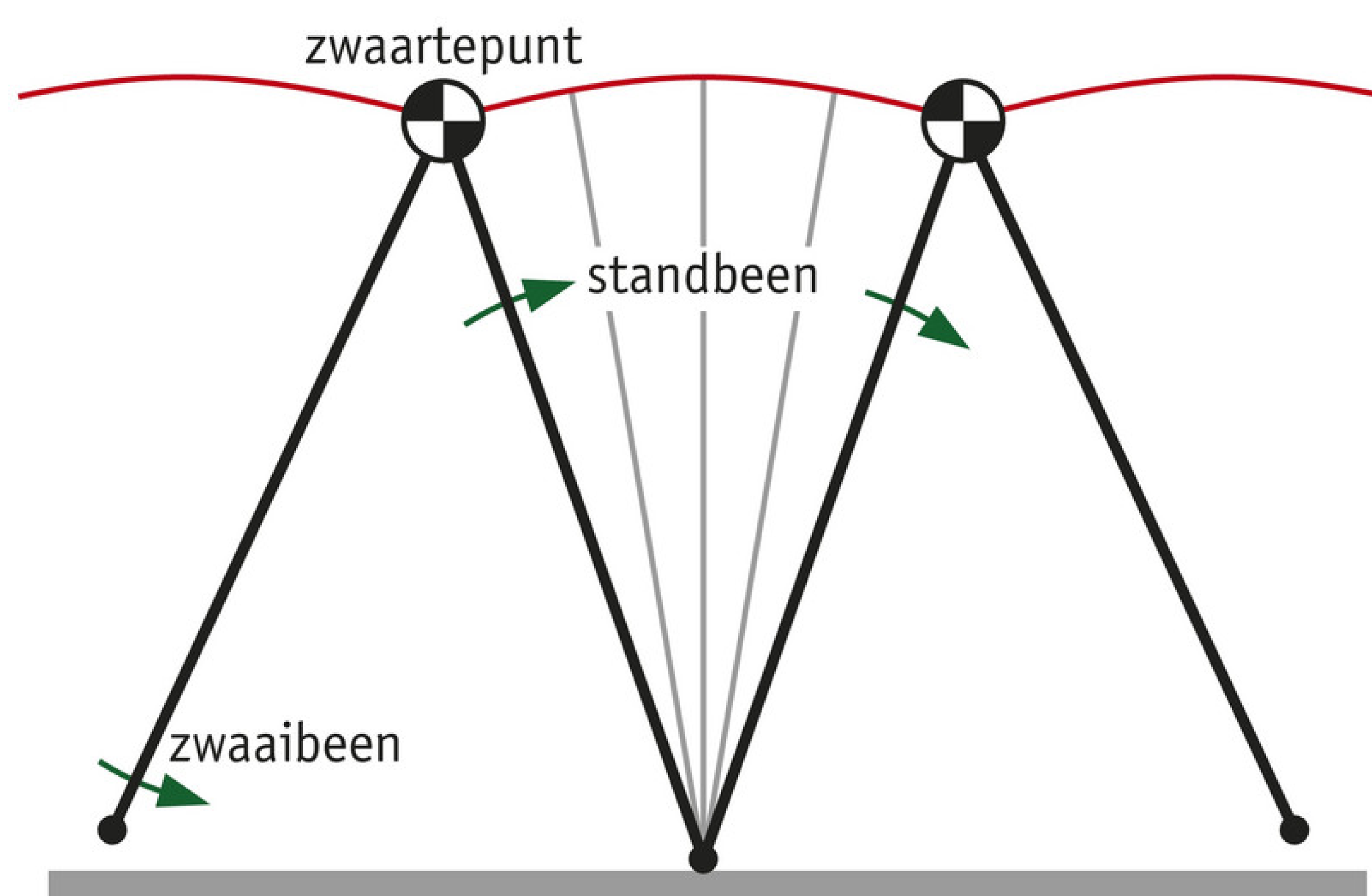
Kenmerkend voor lopen is verder dat er altijd minstens één voet op de grond staat. Dat is een belangrijk verschil met hardlopen (rennen), waarbij je een deel van de tijd met beide voeten los bent van de grond.
Belangrijke eigenschappen van de loopcyclus zijn de **stapfrequentie** (het aantal stappen per tijdseenheid) en de **staplengte** (de afstand die tijdens elke stap wordt afgelegd).



▲ **figuur 1** de loopcyclus

Lopen als dubbele slingerbeweging

Biofysici hebben een eenvoudig loopmodel ontwikkeld (figuur 2). In dit model wordt het zwaaibeen gezien als een gewone slinger, met het draaipunt aan de bovenkant. Het standbeen wordt bekeken als een omgekeerde slinger, met het draaipunt aan de onderkant. Het zwaartepunt van het lichaam bevindt zich in het scharnierpunt van de beide benen.

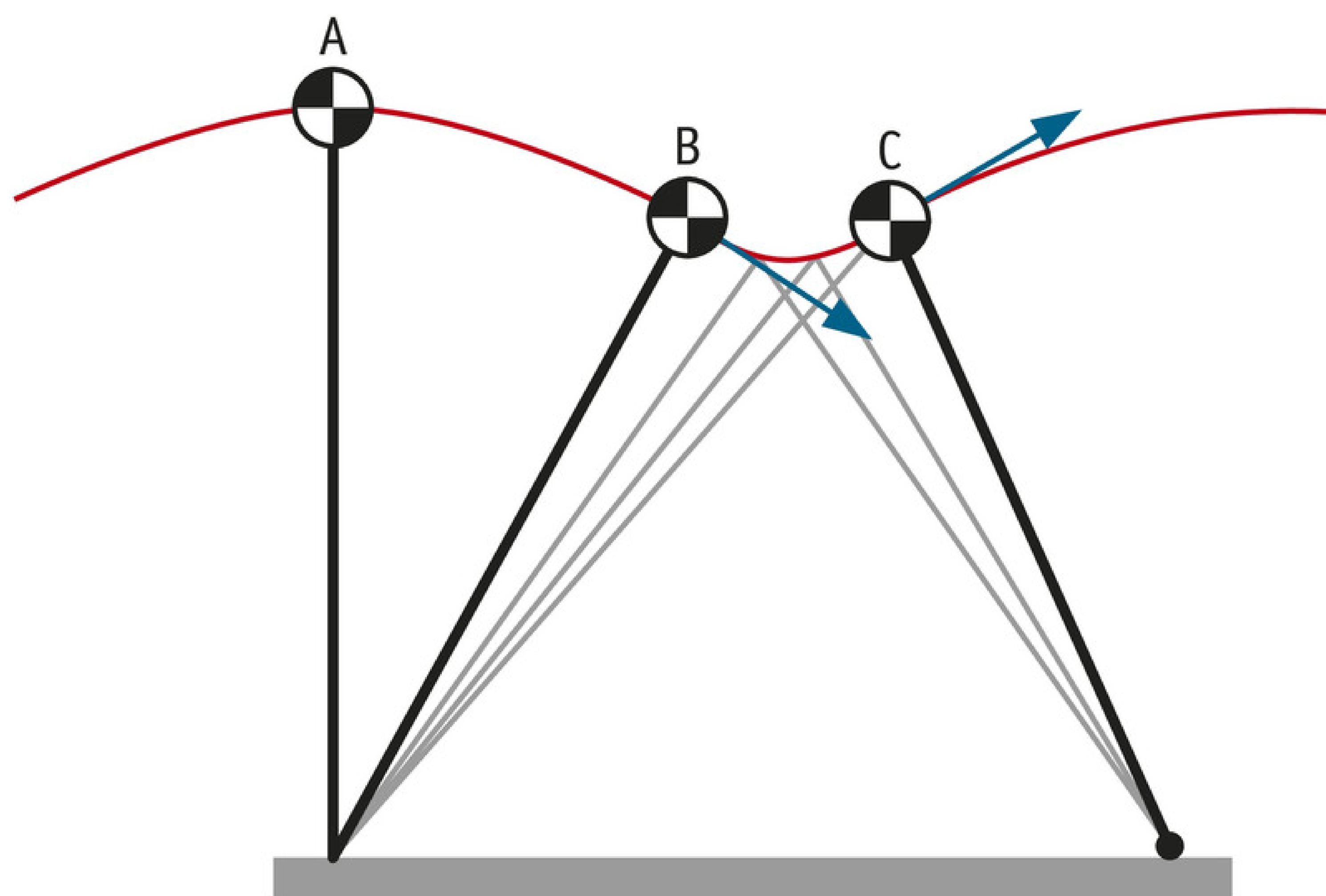


◀ **figuur 2** eenvoudig loopmodel: één stap

Dit model is een sterke vereenvoudiging van de werkelijkheid. Toch kunnen bepaalde aspecten van de werkelijkheid er goed mee begrepen worden. Je benen hebben bijvoorbeeld, net als een 'echte' slinger, een natuurlijke frequentie. Dat is de frequentie waarmee een slinger heen en weer gaat bewegen als je hem een duwtje geeft. Hoe langer een slinger, des te kleiner is zijn natuurlijke frequentie.
Het kost weinig energie om een slinger met de natuurlijke frequentie een flinke uitwijking te geven. Dan is af en toe een zetje op het juiste moment al voldoende (dat merk je als je een kind op een schommel aanduwt). Maar als je de slinger (bij dezelfde uitwijking) met een grotere of kleinere frequentie wilt laten bewegen, is er meer energie nodig.
Dit verklaart waarom de stapfrequentie van mensen in de buurt ligt van de natuurlijke frequentie van hun benen. Als dat niet zo was, zouden ze te veel energie in de beweging van de benen stoppen. Het verklaart ook waarom de stapfrequentie afneemt naarmate mensen langer zijn. De natuurlijke frequentie van een lang been is kleiner dan die van een kort been.

Energie, staplengte en stapfrequentie

In het eenvoudige loopmodel van figuur 2 beschrijft het zwaartepunt van het lichaam bij elke stap een boog. Daarbij wordt kinetische energie ($E_k = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$) omgezet in zwaarte-energie ($E_z = m \cdot g \cdot h$). Als het zwaartepunt het hoogste punt gepasseerd is, gebeurt het omgekeerde: dan beweegt het zwaartepunt weer naar beneden en wordt zwaarte-energie omgezet in kinetische energie. Dit gebeurt als het zwaartepunt in figuur 3 van A naar B beweegt. Daar hoeft, als de benen vrij heen en weer kunnen bewegen, geen energie bij.



▲ **figuur 3** beweging van het zwaartepunt

Dat verandert als de voorste voet de grond raakt. Het zwaartepunt moet dan plotseling van richting veranderen: van omlaag (aan het einde van de vorige stap) naar omhoog (aan het begin van de volgende stap). Dit gebeurt in figuur 3 tussen B en C. Voor deze richtingsverandering is energie nodig. Het lichaam maakt onder andere gebruik van veerenergie die in de pezen is opgeslagen: hun veerkracht zorgt voor een afzeteffect dat netto geen energie kost. Daarnaast is er ook chemische energie nodig om spieren te laten samentrekken en arbeid te verrichten.
Hoe groter de staplengte, des te sneller en steiler beweegt het zwaartepunt aan het einde van een stap naar beneden. De hoeveelheid energie die nodig is om het zwaartepunt van richting te laten veranderen, neemt daardoor toe. Als je alleen let op dit energieverbruik, kun je het beste met heel kleine stapjes lopen. De richtingsverandering van het zwaartepunt is dan minimaal.
Toch lopen mensen niet met heel kleine stapjes. Dat heeft te maken met de stapfrequentie: die moet bij zulke kleine stapjes 'onnatuurlijk' hoog zijn om op een redelijke snelheid uit te komen.
Om de optimale staplengte en stapfrequentie te vinden, moet je lichaam een afweging maken: niet te grote stappen, want dan is er te veel energie nodig om het zwaartepunt van richting te laten veranderen. Niet te kleine stappen, want dan kost het te veel energie om de frequentie van de benen op te voeren. Voor een volwassene van 1,80 m die met een snelheid van 5 km h^{-1} loopt, is de optimale staplengte circa 70 cm en de optimale stapfrequentie circa 2 Hz.

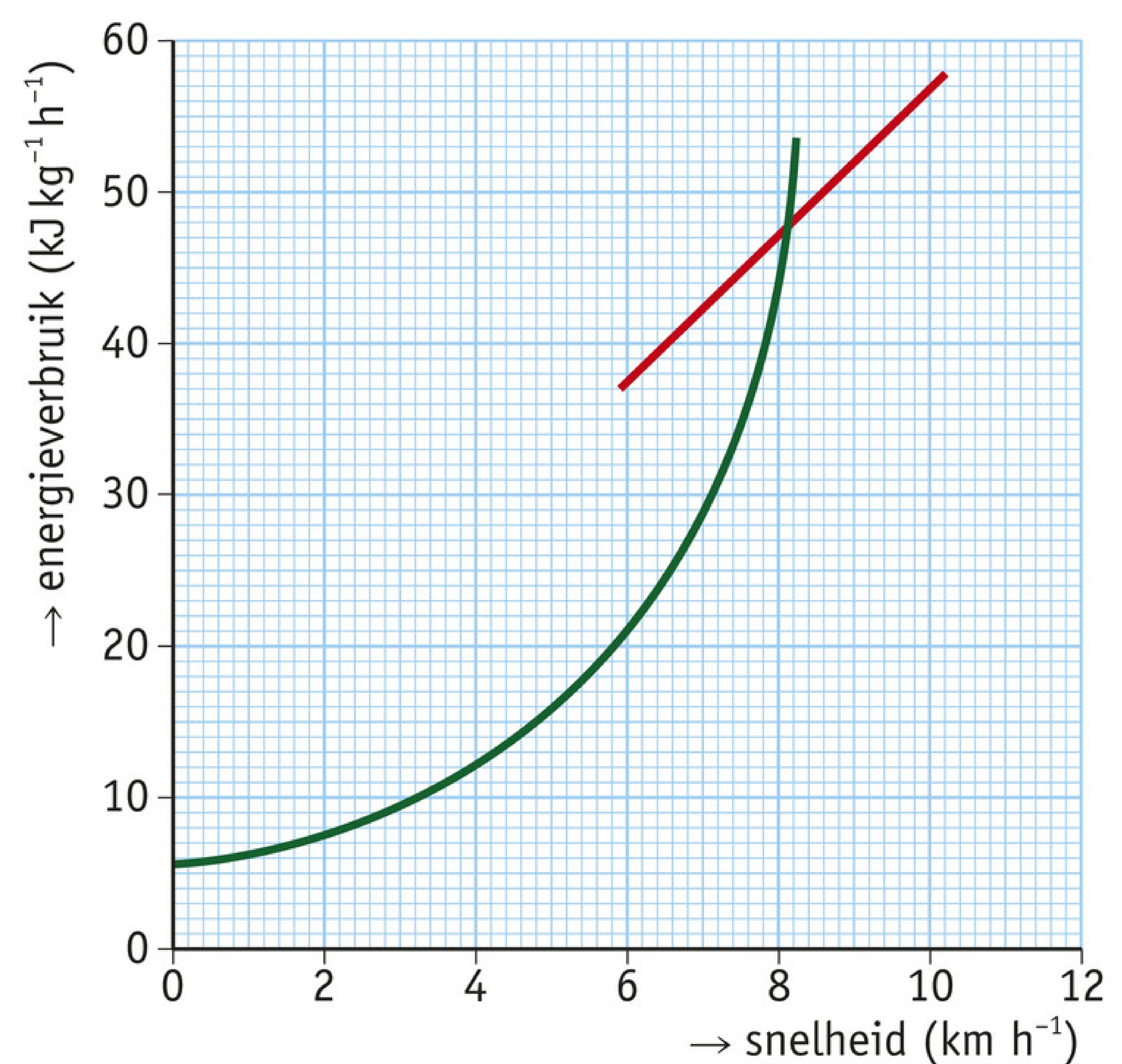
Van lopen naar rennen

Om erachter te komen hoeveel chemische energie bij het lopen wordt verbruikt, laten onderzoekers een proefpersoon op een loopband lopen. Ondertussen meten ze de zuurstof- en de koolstofdioxideconcentratie van de omgevingslucht én van de lucht die de proefpersoon uitademt (figuur 4). Het verschil tussen die twee is wat de proefpersoon heeft gebruikt aan zuurstof en heeft geproduceerd aan koolstofdioxide. Uit deze gegevens kan het energieverbruik berekend worden.

Je lichaam gebruikt chemische energie, zelfs als je helemaal niets doet. Om te bepalen hoeveel energie het lopen kost, moet het energieverbruik twee keer gemeten worden: één keer als de proefpersoon stilstaat en één keer als de proefpersoon loopt. Het verschil tussen die twee is de hoeveelheid energie die het lopen kost. Deze hoeveelheid energie wordt vaak uitgedrukt in $J\,m^{-1}\,kg^{-1}$: het aantal joules dat de proefpersoon verbruikt per meter en per kg lichaamsgewicht. In figuur 5 zie je hoe groot het energieverbruik is bij verschillende snelheden. De groene lijn geeft het energieverbruik bij lopen, de rode lijn bij hardlopen. Je ziet dat vanaf een snelheid van circa 8 $km\,h^{-1}$ hardlopen minder energie kost per uur, en dus ook per meter afgelegde afstand, dan lopen. Dit is ook de snelheid waarbij mensen uit zichzelf overschakelen van lopen op rennen.



▲ **figuur 4** meten hoeveel chemische energie bij het lopen wordt verbruikt



▲ **figuur 5** het energieverbruik bij lopen (groen) en rennen (rood)

Biofysici die zich bezighouden met de manier waarop mensen en dieren bewegen, werken vaak met het **getal van Froude**. Met dit getal kun je de bewegingen van mensen en dieren onder heel uiteenlopende omstandigheden vergelijken. Het getal van Froude is gedefinieerd als:

$$Fr = \frac{v^2}{g \cdot l}$$

Hierin is:

- v de bewegingssnelheid in meter per seconde ($m\,s^{-1}$);
- g de valversnelling in meter per seconde kwadraat ($m\,s^{-2}$);
- l de lengte van een been of poot in meter (m).

Voor een mens met een beenlengte van 90 cm en een snelheid van 1,25 m s^{-1} is het getal van Froude gelijk aan:

$$Fr = \frac{v^2}{g \cdot l} = \frac{1{,}25^2}{9{,}8 \times 0{,}90} \approx 0{,}18$$

Mensen of dieren bewegen op een vergelijkbare manier als hun Froude-getal even groot is, ook al zijn hun massa en afmetingen heel verschillend. Tot $Fr \approx 0{,}5$ lopen (stappen) ze, van $Fr \approx 0{,}5$ tot $Fr \approx 2{,}5$ rennen (draven) ze, en vanaf $Fr \approx 2{,}5$ bewegen ze vaak op een minder regelmatige manier. Dat zie je bijvoorbeeld bij het galopperen van een paard.

▶ **EXPERIMENT 1** Videometing van een loopbeweging (onderzoekspracticum)

Onthoud!

- Je kunt lopen zien als een dubbele slingerbeweging, met het zwaaibeen als gewone slinger en het standbeen als omgekeerde slinger.
- De stapfrequentie van mensen ligt in de buurt van de natuurlijke frequentie van hun benen, omdat er voor het bewegen van de benen dan weinig energie nodig is.
- Na elke stap moet het zwaartepunt van het lichaam van richting veranderen. Daarvoor moeten je spieren arbeid verrichten en dat kost chemische energie.
- Mensen en andere dieren bewegen op een vergelijkbare manier als hun getal van Froude, $Fr = \frac{v^2}{g \cdot l}$, even groot is.

Opdrachten

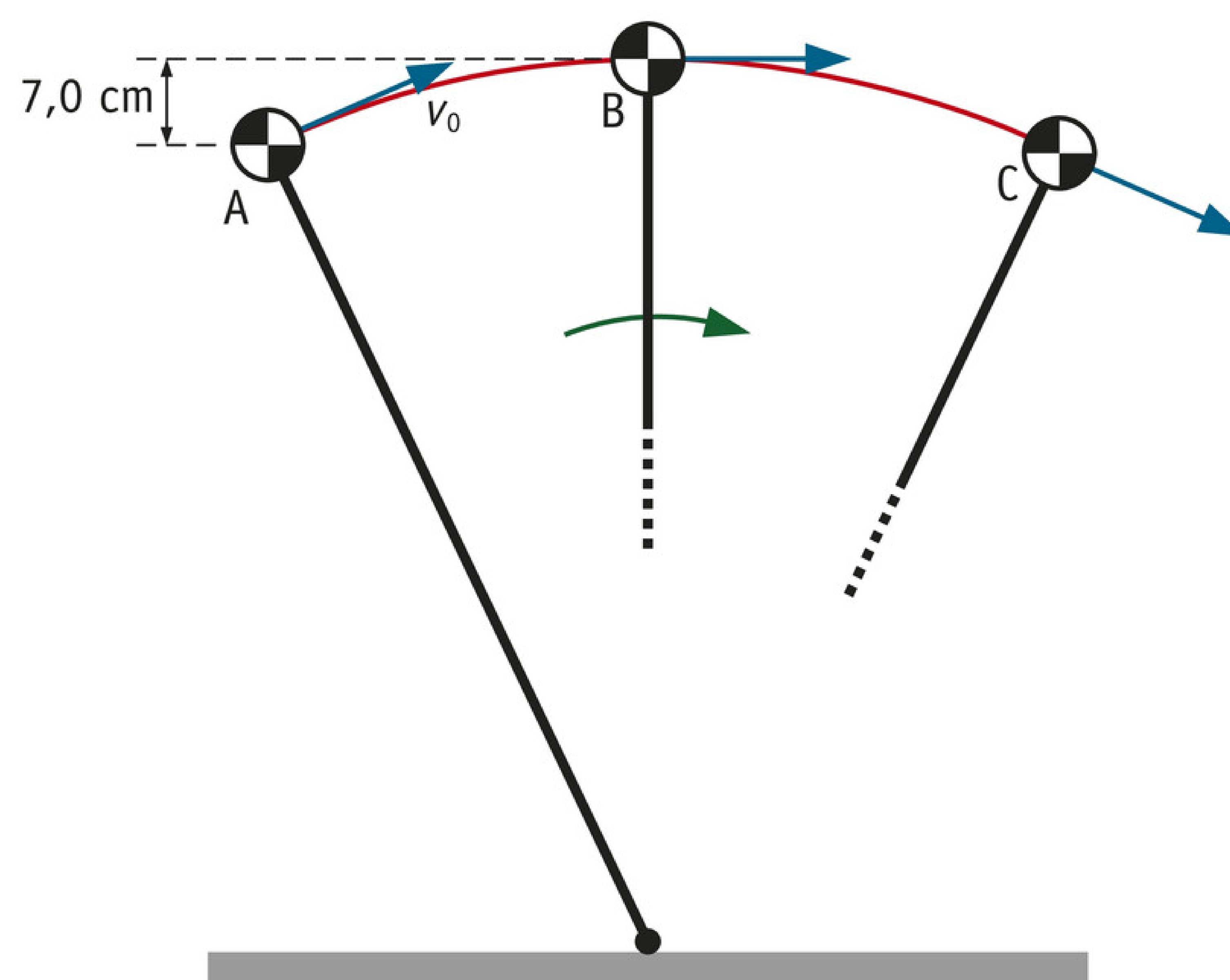
1 Zwaartepunt

In figuur 6 beweegt het zwaartepunt in een boog van A via B naar C. De totale hoeveelheid mechanische energie ($E_k + E_z$) blijft constant.

In punt A beweegt het zwaartepunt schuin omhoog met een snelheid v_0.

a Bereken hoe snel het zwaartepunt beweegt in punt B, als v_0 = 1,5 m s^{-1}.

b Bereken hoe groot v_0 op zijn minst moet zijn om punt B te bereiken.



▲ **figuur 6** van E_k naar E_z en weer terug

2 Kinderen
Kleine kinderen hebben een hogere stapfrequentie dan volwassenen als ze met dezelfde snelheid lopen.
Geef hiervoor een verklaring met behulp van het loopmodel in deze paragraaf.

3 Fietsen
Fietsen is een efficiëntere vorm van voortbewegen dan lopen. Onder gunstige omstandigheden kan de efficiëntie van fietsen wel drie keer zo hoog zijn als die van lopen.

a Betekent dit dat een uur fietsen onder gunstige omstandigheden drie keer zo weinig energie kost als een uur lopen? Zo nee, wat betekent het dan wel?
b Hoe beweegt het zwaartepunt van je lichaam als je loopt? En hoe beweegt het zwaartepunt als je fietst?
c De manier waarop het zwaartepunt beweegt, is een van de oorzaken waardoor fietsen minder energie kost dan lopen.
Leg uit hoe dat zit.

4 Voedsel
Uit proeven met een loopband blijkt dat lopen met een snelheid van 5 $km\,h^{-1}$ ongeveer 3,3 $J\,m^{-1}\,kg^{-1}$ energie kost.

a Bereken hoeveel kilometer een volwassene van 70 kg kan afleggen op 34 MJ energie uit voedsel (het equivalent van 1 L benzine), als hij loopt met een snelheid van 5 $km\,h^{-1}$.
b Zoek op internet op hoeveel kilometer een willekeurige auto kan afleggen op 1 L benzine. Vergelijk die afstand met de waarde die je bij opdracht a hebt berekend. Wat is je conclusie?

+5 Vermogen
Voor biofysici is het energieverbruik per kilogram (lichaamsmassa) en per meter (afgelegde afstand), afgekort als E_w, een belangrijke grootheid. Daarnaast rekenen biofysici ook vaak met het vermogen per kilogram (lichaamsmassa), afgekort als P_w.

a Wat is het verband tussen E_w en P_w? Kies uit de volgende formules. Hierin is *s* de afgelegde afstand, *v* de snelheid waarmee die afstand werd afgelegd en *t* de tijd die daarvoor nodig was.

A $P_w = E_w \cdot s$

B $P_w = \dfrac{E_w}{s}$

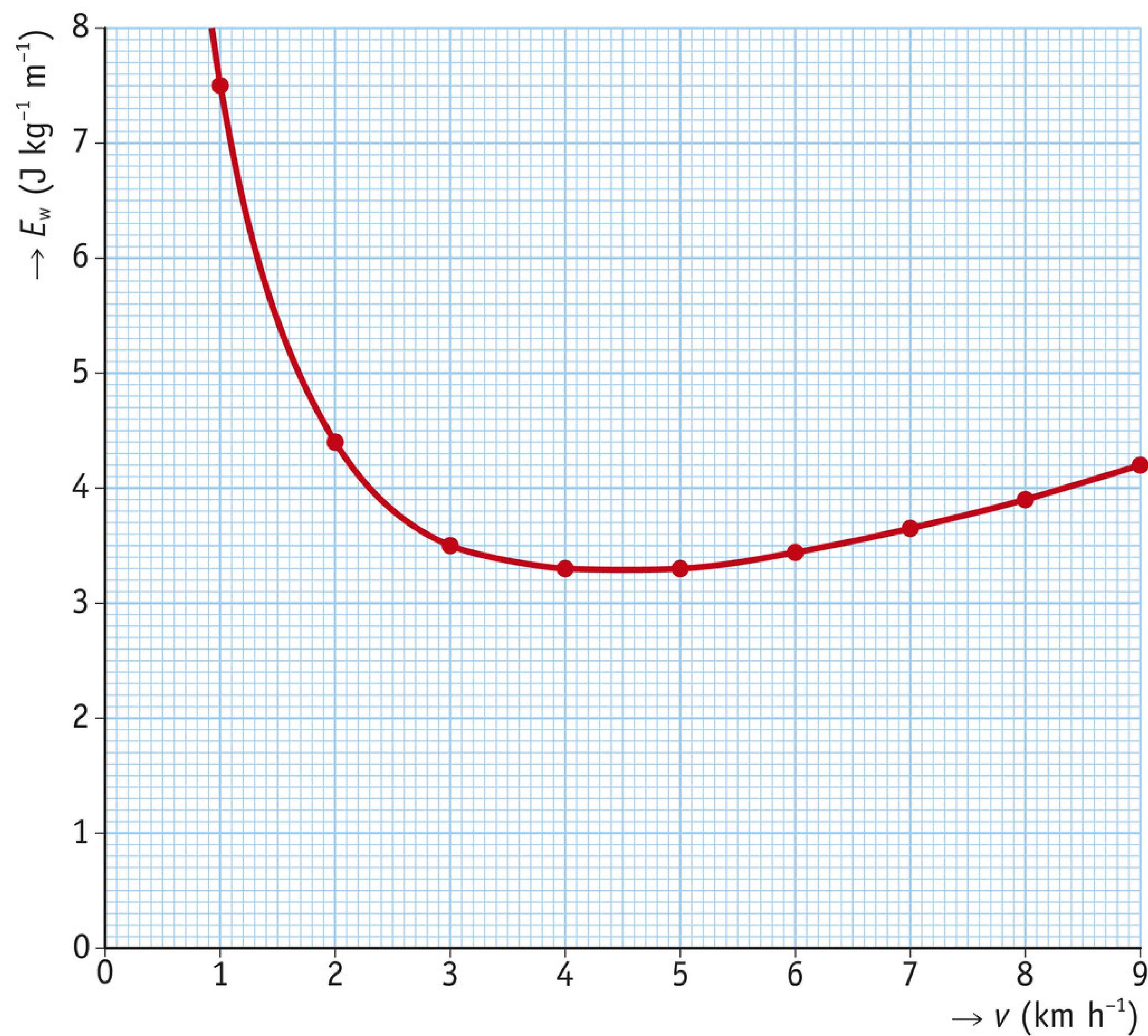
C $P_w = E_w \cdot v$

D $P_w = \dfrac{E_w}{v}$

E $P_w = E_w \cdot t$

F $P_w = \dfrac{E_w}{t}$

b Vul tabel 1 in. Lees de waarden van E_w af uit figuur 7. Bereken P_w met de formule die je bij a hebt gekozen.
c Teken een diagram waarin je P_w uitzet tegen *v*.
d Wat voor soort verband bestaat er tussen P_w en *v*? Licht je antwoord toe.



▲ **figuur 7** energieverbruik per kilogram per meter, als functie van de snelheid

▼ **tabel 1** het verband tussen P_w en v

v (km h^{-1})	v (m s^{-1})	E_w (J m^{-1} kg^{-1})	P_w (W kg^{-1})
1			
2			
3			
4	1,1	3,3	3,7
5			
6			
7			
8			
9			

6 Hollen

Johan (32 jaar, 1,82 m) brengt zijn zoontje Erwin (4 jaar, 1,05 m) naar school. Johan is laat en loopt daarom haastig over het schoolplein. Erwin moet hollen om zijn vader bij te houden.

a Bereken hoe groot de Froude-getallen zijn van Johan en Erwin bij een snelheid van 7,0 km h^{-1}. Gebruik figuur 8 om hun beenlengte te schatten.

b Bereken bij welke snelheid Erwin hetzelfde Froude-getal heeft als zijn vader.



▶ **figuur 8** Erwin en Johan

+7 Maan
Zoek een video op YouTube waarop je kunt zien hoe Amerikaanse astronauten zich in 1971 of 1972 voortbewogen over het maanoppervlak. Gebruik 'moonwalk 1971 1972'.
- **a** Beschrijf hoe hun manier van voortbewegen eruitziet en vergelijk die met lopen.
- **b** Schat hoe groot hun getal van Froude is. Schrijf op hoe je aan je schatting komt.
- **c** Had je met het getal van Froude hun manier van voortbewegen kunnen voorspellen? Licht je antwoord toe.
- **d** Welke factor zorgt ervoor dat je op de maan een ander getal van Froude hebt dan op aarde, ook al komen beide situaties verder helemaal overeen?

2 Evenwicht: het zesde zintuig

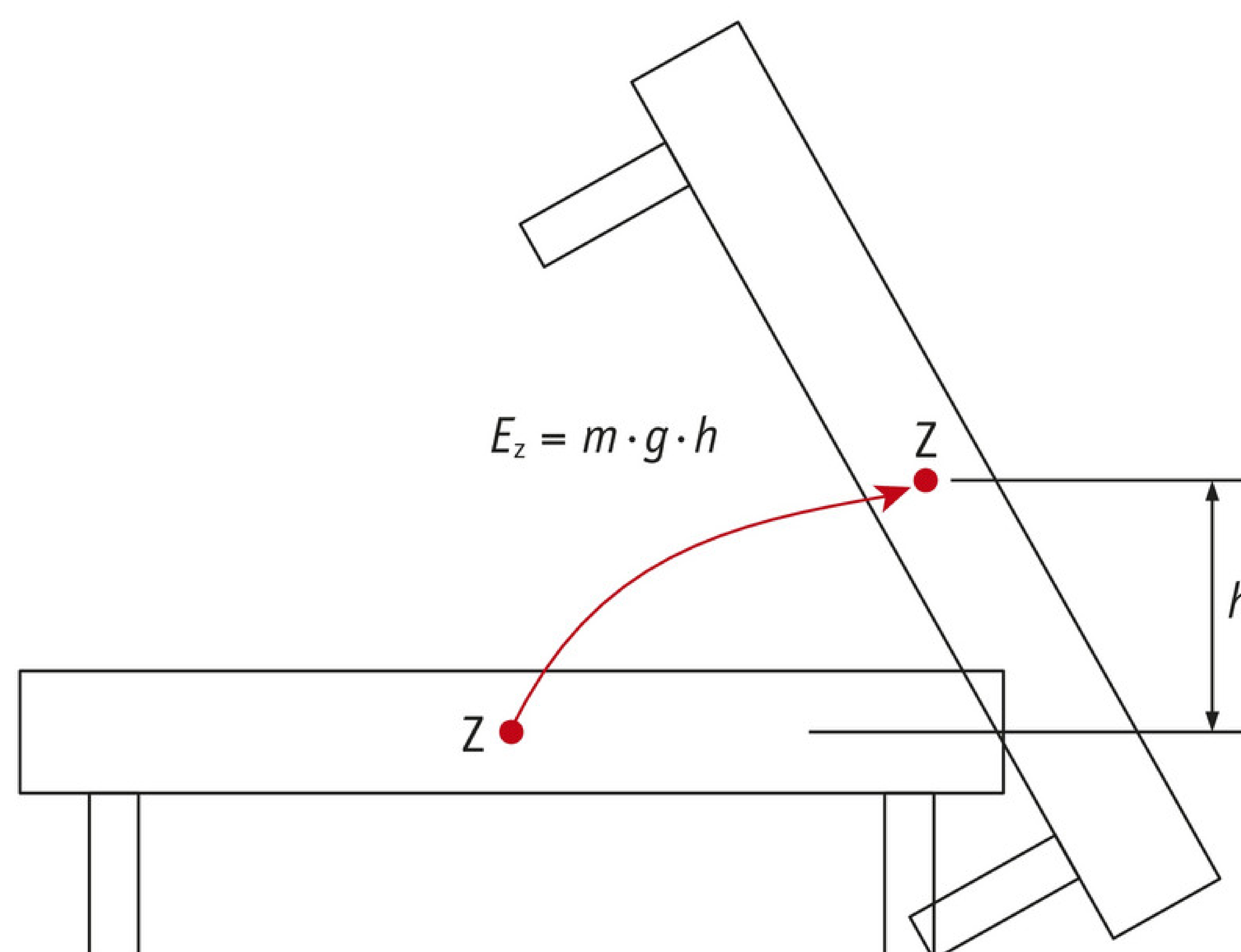
In deze paragraaf leer je:
- hoe het evenwichtsorgaan detecteert hoe je beweegt.

De manier waarop mensen hun evenwicht bewaren, is intensief onderzocht. Daarbij spelen technieken uit de biofysica een belangrijke rol. Daarmee kon achterhaald worden hoe het evenwichtsorgaan van gewervelde organismen, zoals de mens, functioneert.

Je evenwicht bewaren

Een voorwerp is in evenwicht als het zwaartepunt zich boven het steunvlak bevindt. Hoe **stabiel** (moeilijk te verstoren) het evenwicht is, hangt af van drie factoren:
- de afmetingen van het steunvlak;
- de plaats van het zwaartepunt;
- de zwaartekracht op het voorwerp.

Een zwaar voorwerp met een groot steunvlak en een laag en centraal gelegen zwaartepunt is erg stabiel. In figuur 9 zie je hoe dat komt. Er is veel energie nodig om zo'n voorwerp zo ver te roteren dat het zwaartepunt zich niet meer boven het steunvlak bevindt. Een licht voorwerp met een klein steunvlak en een hoog en niet-centraal gelegen zwaartepunt is juist weinig stabiel. Bij zo'n voorwerp is er maar weinig energie nodig om het evenwicht te verstoren.



▲ **figuur 9** een stabiele tafel

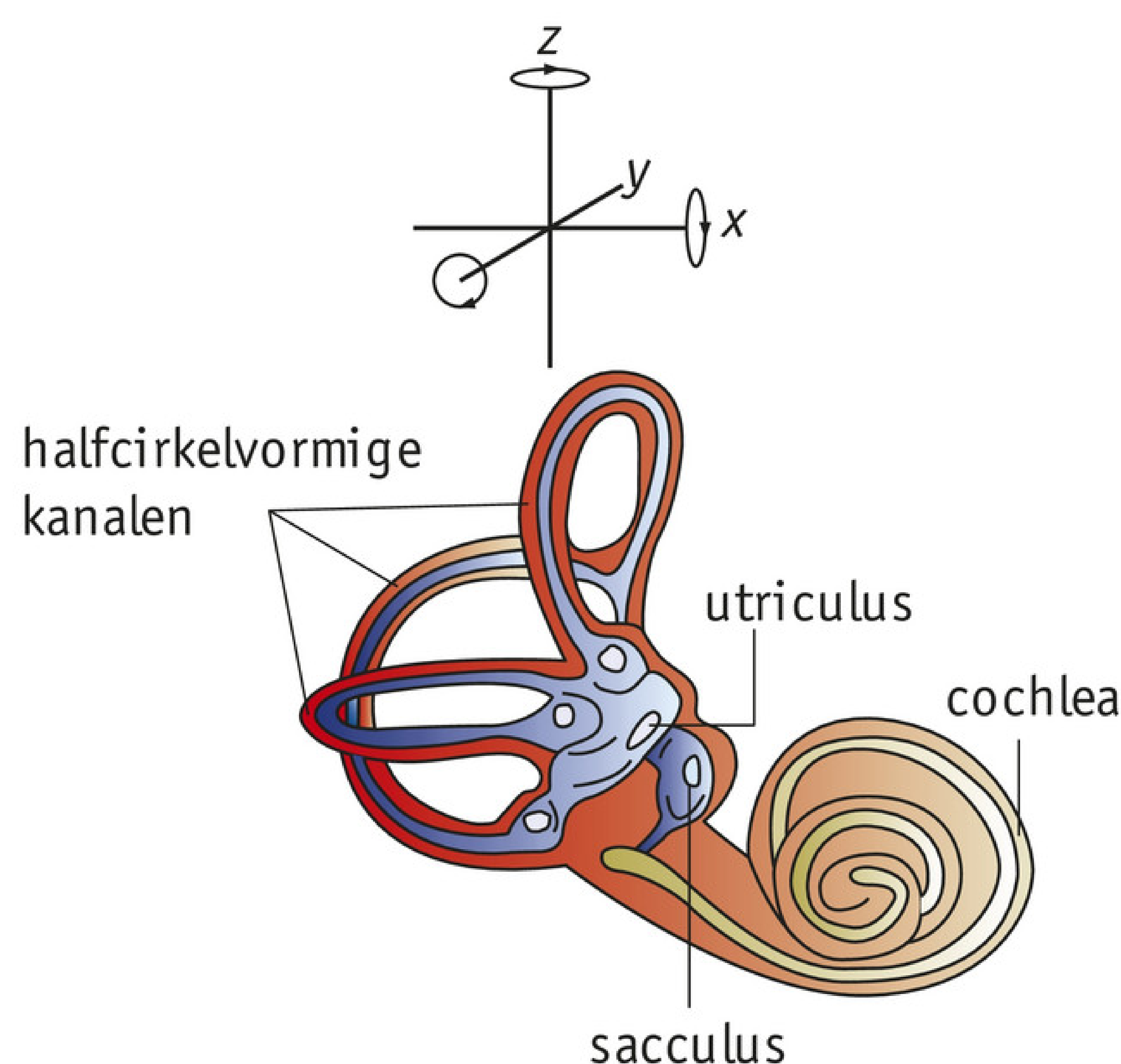
Bij een star voorwerp, zoals een tafel of een stoel, ligt het zwaartepunt op een vaste plaats. Bij mensen is dat anders. Als je rechtop stilstaat, verschuift het zwaartepunt voortdurend een klein beetje, doordat je lichaamsdelen kleine bewegingen maken. Door spieren samen te trekken of juist te ontspannen, voert je lichaam kleine correcties uit, zodat het zwaartepunt niet te ver beweegt van de ideale positie, midden boven het steunvlak. De informatie die hiervoor nodig is, wordt onder andere geleverd door je evenwichtsorgaan.

Stabiliteit bij lopen

Tijdens het lopen is het lichaam vrijwel geen moment in evenwicht. Dat komt doordat het zwaartepunt zich maar zelden recht boven het steunvlak bevindt. Het gevolg is dat je lichaam steeds aan het vallen is: naar voren en naar opzij. Maar doordat je telkens op het juiste moment een voet neerzet, wordt de valbeweging onderbroken en kun je aan een volgende stap beginnen.
Dat je 'stabiel loopt', betekent dat je loopcyclus moeilijk te verstoren is. Je valt niet meteen omver als je opeens een duw krijgt of onverwacht een afstapje tegenkomt. Je lichaam merkt meteen dat een stap niet op de gebruikelijke manier verloopt en voert automatisch een correctie uit. Ook hiervoor is het evenwichtsorgaan een belangrijke informatiebron.

Het evenwichtsorgaan

Het **evenwichtsorgaan** bestaat uit twee helften, één in het linker- en één in het rechterbinnenoor. Beide helften hebben dezelfde opbouw, met drie halfcirkelvormige kanalen en twee statolietorganen, de utriculus en de sacculus (figuur 10). De **halfcirkelvormige kanalen** detecteren of het hoofd een rotatie uitvoert rond de x-, de y- of de z-as. De **statolietorganen** stellen vast in welke richting de zwaartekracht werkt en nemen lineaire versnellingen waar (versnellingen langs een rechte lijn, zoals in een lift of in een optrekkende auto). Deze informatie wordt vervolgens door zenuwvezels doorgegeven aan de hersenen.

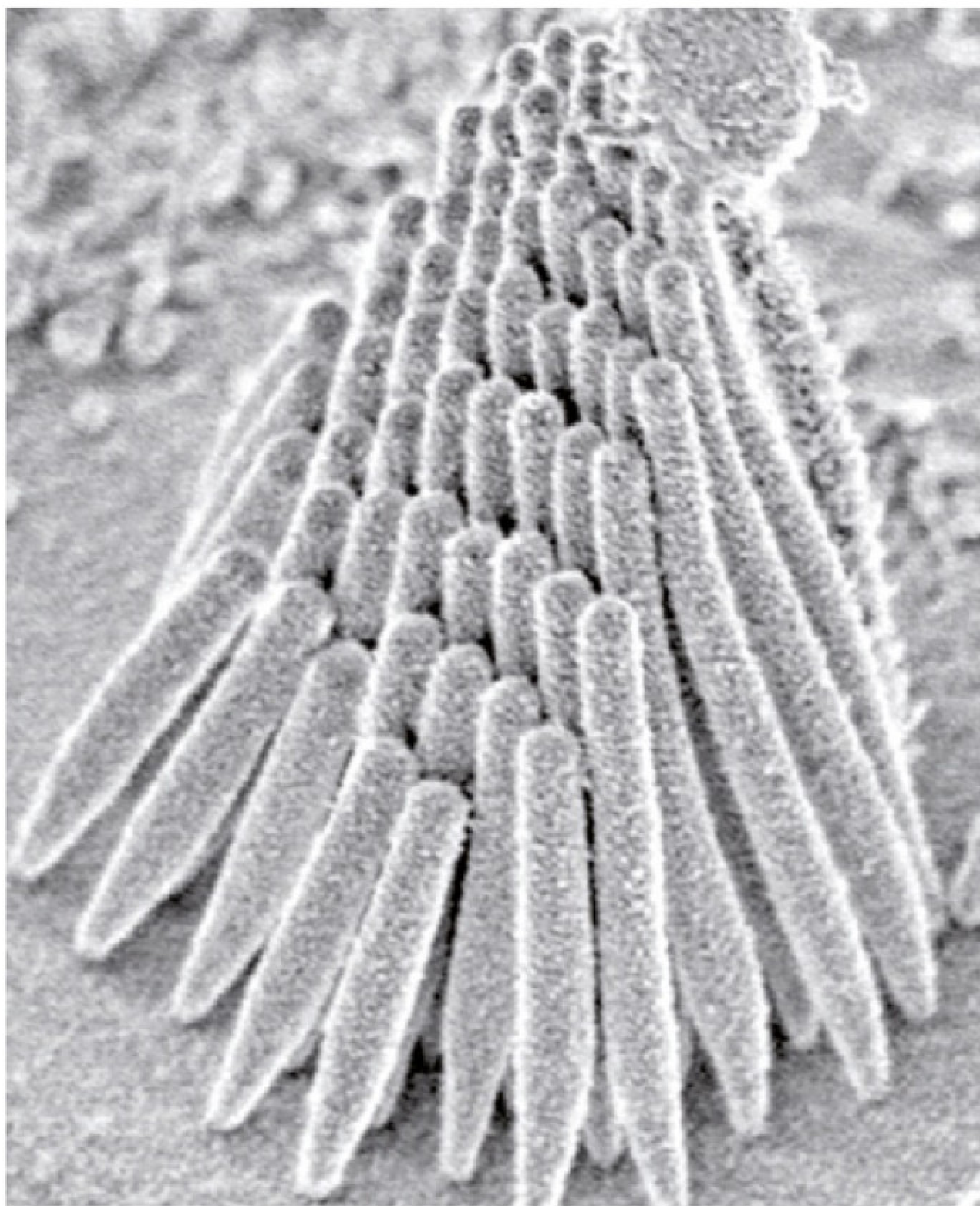


▲ **figuur 10** het evenwichtsorgaan en de cochlea (deel van het gehoororgaan)

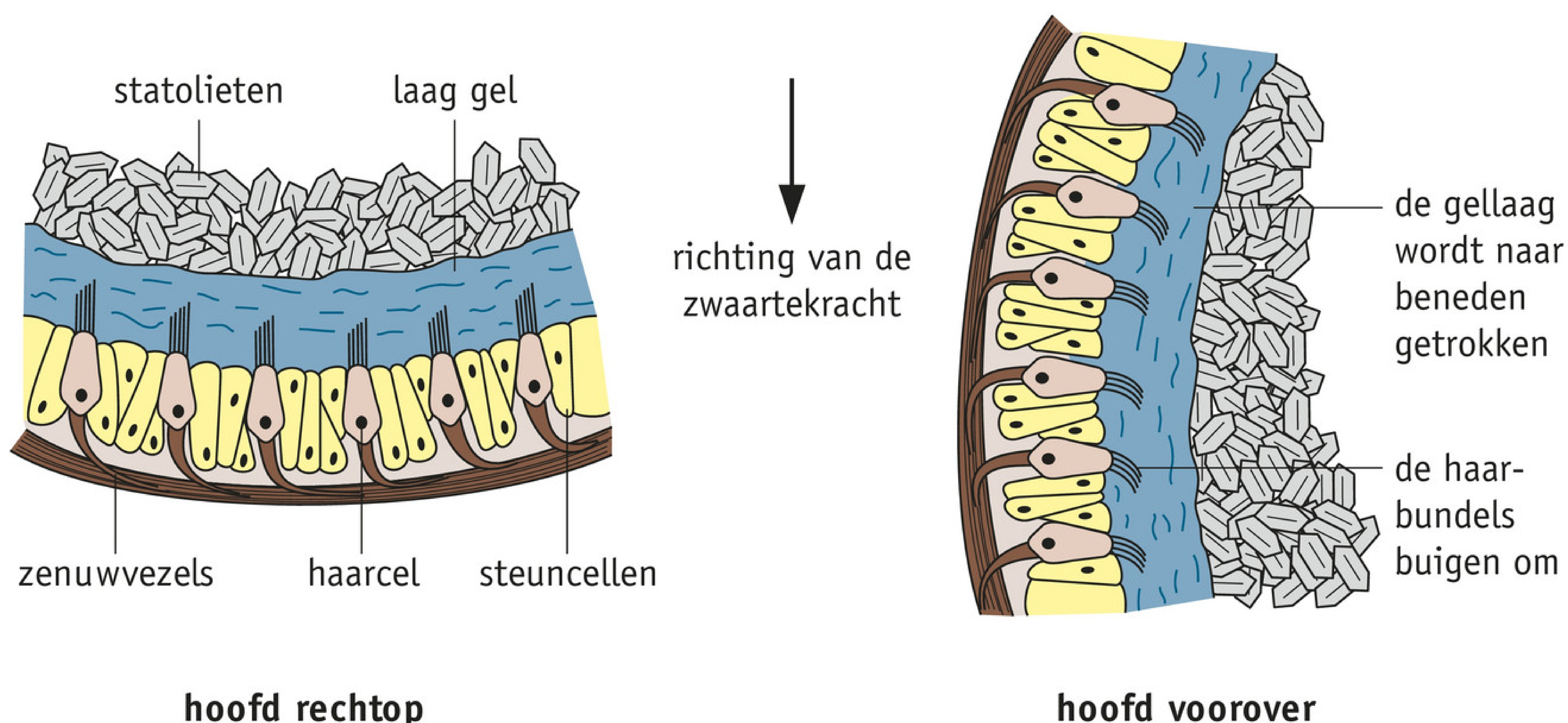
De hersenen combineren deze informatie met gegevens over de stand en de beweging van je overige lichaamsdelen en met de beelden die je ogen leveren. Op basis van het totaalbeeld stuurt het centrale zenuwstelsel de spieren in het lichaam aan, vaak zonder dat je je daarvan bewust bent.

Haarcellen en statolieten

Je evenwichtsorgaan bevat zintuigcellen die uiterst kleine verplaatsingen kunnen waarnemen. Deze cellen worden **haarcellen** genoemd, omdat uit elke cel een bundel met tientallen haren steekt (figuur 11). Als zo'n haarbundel ombuigt, komt de haarcel in actie en genereert een elektrisch signaal. Een uitwijking van 100 picometer is daarvoor al voldoende.
In figuur 12 is een deel getekend van de utriculus, een van de twee statolietorganen. De haarbundels zijn ingebed in een laag gel. Aan de buitenkant van deze laag gel vind je grote aantallen statolieten (oorsteentjes): kristallen calciumcarbonaat die een veel grotere dichtheid hebben dan het omringende materiaal.
Als de stand van het hoofd verandert, verandert de richting van de zwaartekracht ten opzichte van het hoofd. De relatief zware statolieten worden een eindje in de nieuwe richting getrokken en nemen de bovenste laag gel mee, waardoor de haarbundels in de gel ombuigen. De haarcellen zorgen er vervolgens voor dat er een elektrisch signaal naar de hersenen wordt gestuurd.
Wanneer het hoofd versneld beweegt, gebeurt iets vergelijkbaars. Door hun relatief grote traagheid blijven de statolieten achter bij de omringende weefsels. De laag gel waar ze aan vastzitten, vervormt hierdoor, en de haarbundels buigen mee met deze vervorming.



▲ **figuur 11** haarbundel in de sacculus van een brulkikker



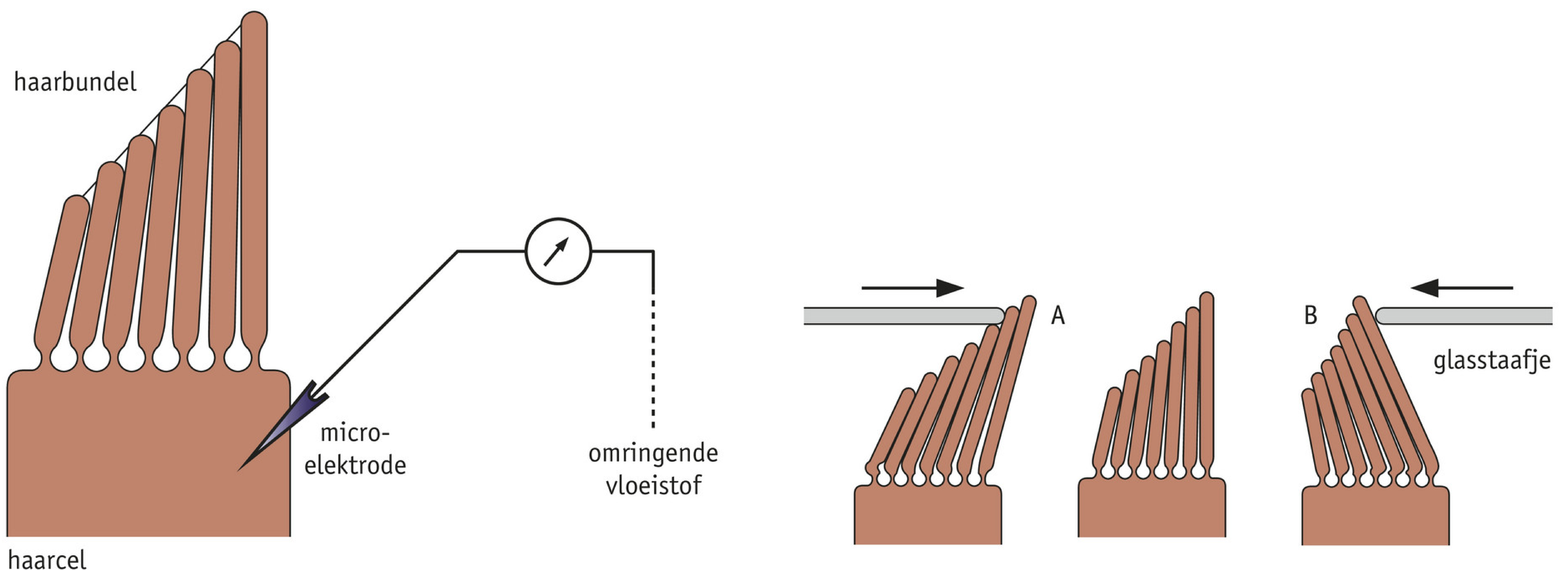
▲ **figuur 12** Zo detecteert het evenwichtsorgaan de stand van het hoofd.

Meten aan haarcellen

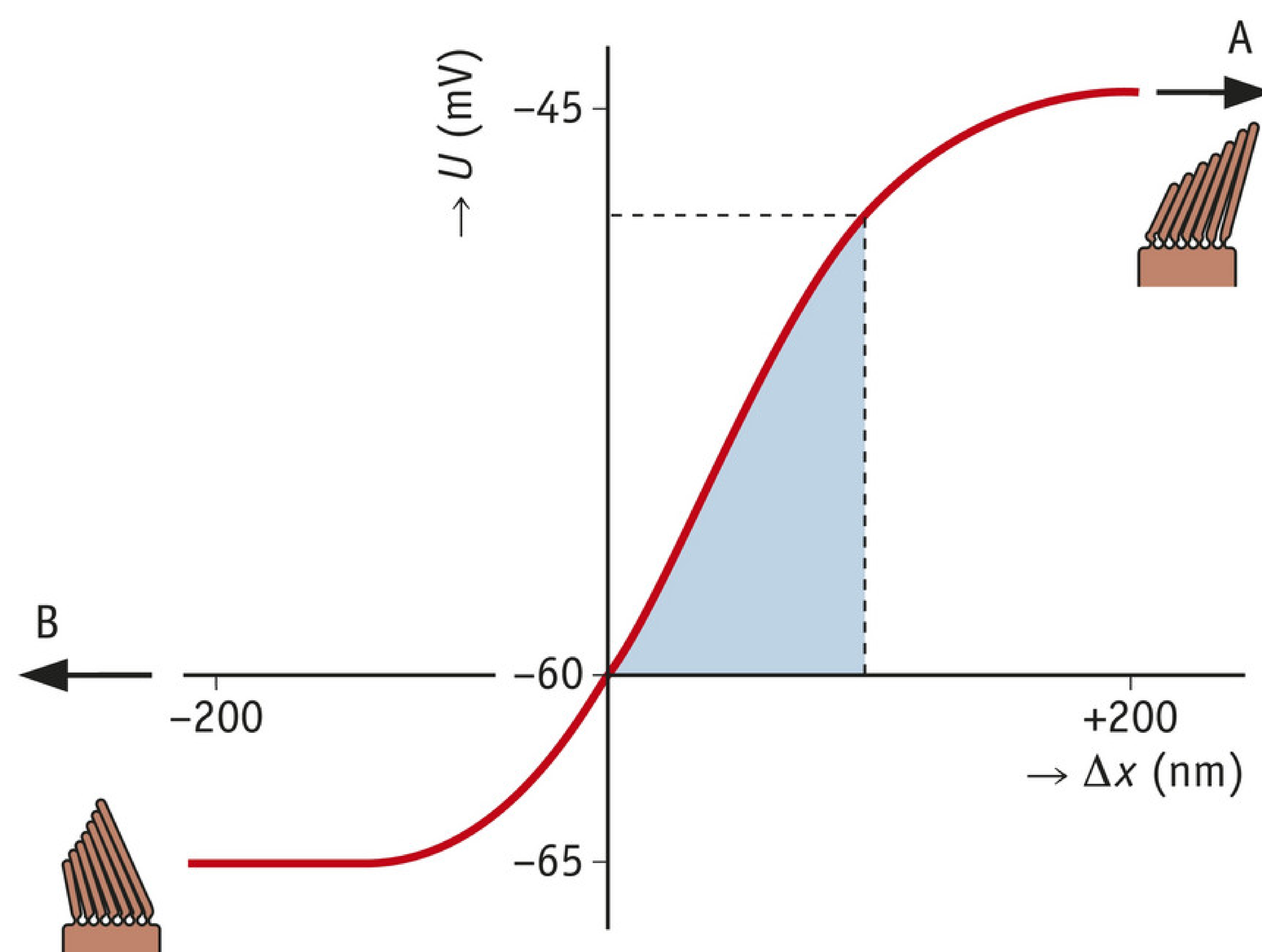
Biofysici hebben apparatuur ontwikkeld waarmee ze metingen kunnen uitvoeren aan individuele haarcellen. Hiervoor worden haarcellen gebruikt die afkomstig zijn van proefdieren. Een onderzoeker maakt de haarcellen vrij, legt ze in een zoutoplossing en plaatst het preparaat onder een microscoop. Met een computergestuurd glasstaafje wordt daarna één haarbundel heen en weer bewogen. Tegelijkertijd wordt de spanning over het celmembraan gemeten met een micro-elektrode (figuur 13).

Op deze manier kun je onderzoeken hoe een haarcel reageert op bewegingen van de haarbundel. In figuur 14 zie je enkele meetresultaten van zo'n proef. Zolang de haarbundel niet buigt, is de spanning over het celmembraan 60 mV (in figuur 13 als negatieve spanning gemeten). Als de haarbundel richting A wordt geduwd, daalt de spanning tot 45 mV. Je zegt dan dat de haarcel **depolariseert**. Als je de haarbundel richting B duwt, stijgt de spanning tot 65 mV. De haarcel **hyperpolariseert**.

Als je de haarbundel in een richting duwt die loodrecht op AB staat, gebeurt er niets. De spanning over het celmembraan verandert dan niet. Duw je de haarbundel in een willekeurige richting, dan wordt alleen de component langs AB geregistreerd. Uit dit soort proeven blijkt dat haarcellen sterk richtingsgevoelig zijn. Verplaatsingen in de polarisatierichting (AB) worden waargenomen, verplaatsingen loodrecht daarop worden genegeerd.



▲ **figuur 13** proef met een haarcel van een brulkikker



▲ **figuur 14** depolarisatie (A) en hyperpolarisatie (B)

Onthoud!

- Je bent in evenwicht als je zwaartepunt zich recht boven je steunvlak bevindt. Omdat een mens geen star voorwerp is, moeten je spieren zich daar voortdurend voor inspannen.
- Het evenwichtsorgaan helpt om het evenwicht te bewaren als je staat en als je loopt.
- Het evenwichtsorgaan levert informatie over de stand van het hoofd en de manier waarop het hoofd beweegt; het detecteert zowel rotaties als lineaire versnellingen.
- Een haarcel depolariseert als zijn haarbundel een bepaalde richting op beweegt, en hyperpolariseert als zijn haarbundel de tegenovergestelde richting op gaat.

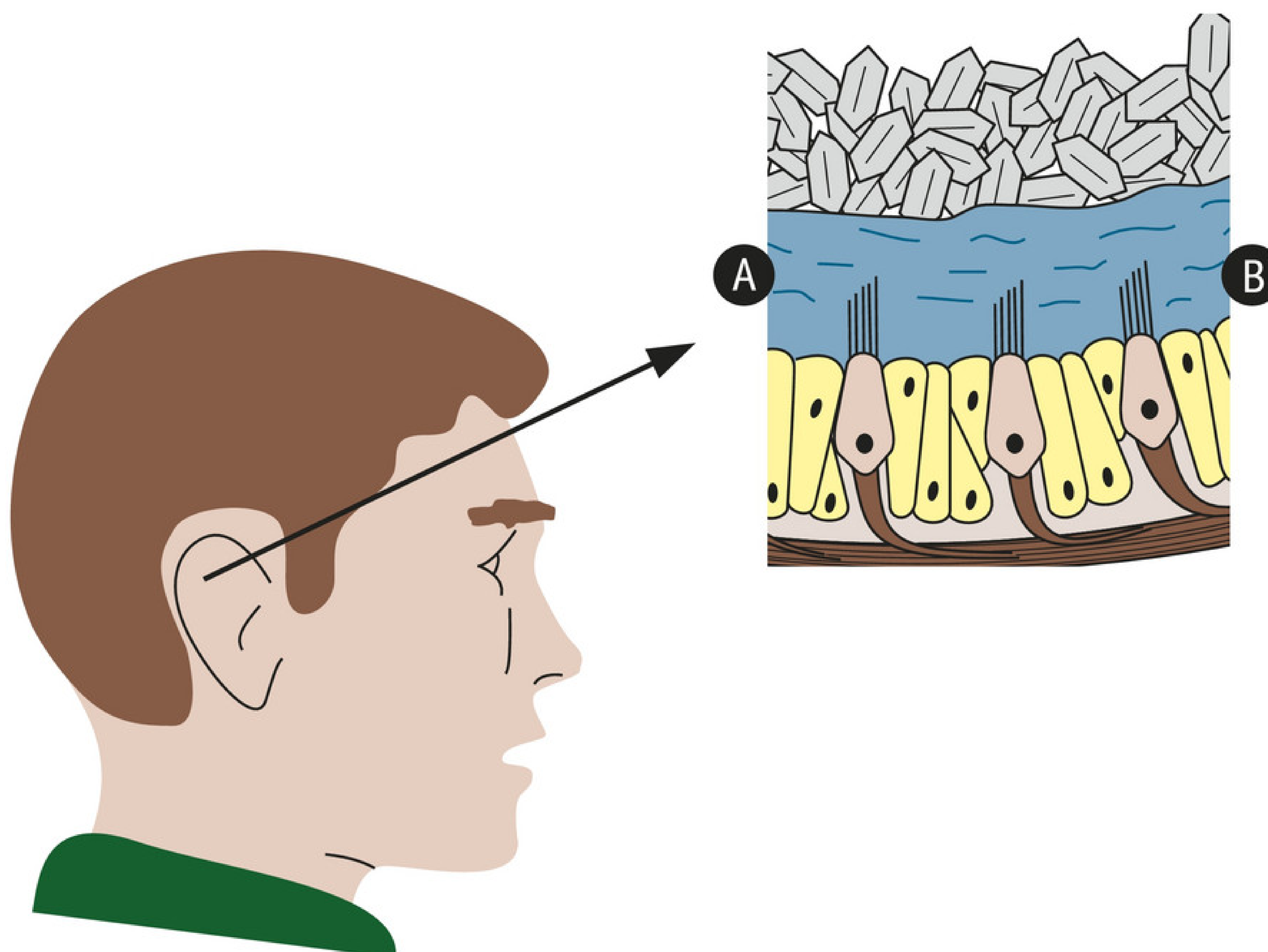
Opdrachten

8 Koffer
Als je aan één hand een zware koffer draagt, pas je automatisch je houding aan.
a Beschrijf hoe je houding er dan uitziet, vergeleken met de gewone situatie.
b Leg uit dat deze aanpassing nodig is om stabiel te kunnen staan. Gebruik de woorden ‘zwaartepunt’ en ‘steunvlak’ in je uitleg.

9 Hond
Een mens staat duidelijk minder stabiel dan een hond met een even grote massa.
a Welke twee factoren zijn verantwoordelijk voor het verschil in stabiliteit?
b In welke richting is een hond het meest stabiel: in zijn lengte of in zijn breedte?
c Hoe komt het dat een hond niet in beide richtingen even stabiel is? Licht je antwoord toe.

10 Statoliet
De dichtheid van calciumcarbonaat, het materiaal waaruit de statolieten bestaan, is bijna drie keer zo groot als die van het omringende weefsel.
Leg uit dat die grotere dichtheid noodzakelijk is voor een goede werking van het evenwichtsorgaan.

11 Gas geven
Rens kijkt recht voor zich uit, terwijl hij aan het autorijden is. In figuur 15 is zijn hoofd getekend, met daarnaast – sterk vergroot – enkele haarcellen in zijn rechterutriculus.
a Waaraan kun je zien dat Rens op dit moment met een constante snelheid rijdt?
b In welke richting (A of B) bewegen de haarbundels als Rens het gaspedaal flink intrapt?



▲ **figuur 15** autorijden met een constante snelheid

12 Liggen

Wanneer je op je rug ligt, worden de haarcellen in je statolietorganen op dezelfde manier geprikkeld als wanneer je versneld vooruit beweegt.

a Leg uit hoe het komt dat je haarcellen deze twee situaties niet van elkaar kunnen onderscheiden.

Andere zintuigsystemen helpen je lichaam om dat onderscheid wel correct te maken.

b Noem twee zintuigsystemen die daarbij een rol zouden kunnen spelen.

13 Depolariseren

Onderzoekers hebben het mechanisme ontdekt waardoor een haarcel depolariseert. Het ombuigen van een haarbundel opent poriën in het celmembraan, waardoor ionen uit de omringende vloeistof de haarcel kunnen binnenkomen.
De omringende vloeistof bevat zowel positieve ionen (zoals K^+) als negatieve ionen (zoals Cl^-).

a Hoe komt het dat positieve ionen de cel binnengaan als de poriën worden geopend, terwijl negatieve ionen buiten blijven?

b Hoe verandert de spanning over het celmembraan onder invloed van deze instroom?

+14 Evenwichtsorgaan

In het leerboek *Keel-neus-oorheelkunde en hoofd-hals-chirurgie* staat over het evenwichtsorgaan:
Het *evenwichtsorgaan* (het zesde zintuig) vormt de primaire sensor voor het meten van de stand en bewegingen van ons hoofd in de ruimte. Het detecteert de hoofdstand ten opzichte van de zwaartekracht binnen een halve graad nauwkeurig en meet hoofdversnellingen groter dan 0,5° s^{-2} (rotaties) en 2 cm s^{-2} (translaties).

a Leg uit hoe de beweging van het hoofd verandert bij een versnelling van 1° s^{-2}.

b Geef een voorbeeld van een situatie waarin zo'n versnelling kan optreden.

c Door welk deel van het evenwichtsorgaan wordt zo'n versnelling gemeten?

d Leg uit hoe de beweging van het hoofd verandert bij een versnelling van 5 cm s^{-2}.

e Geef een voorbeeld van een situatie waarin zo'n versnelling kan optreden.

f Door welk deel van het evenwichtsorgaan wordt zo'n versnelling gemeten?

3 Moleculaire motoren

In deze paragraaf leer je:

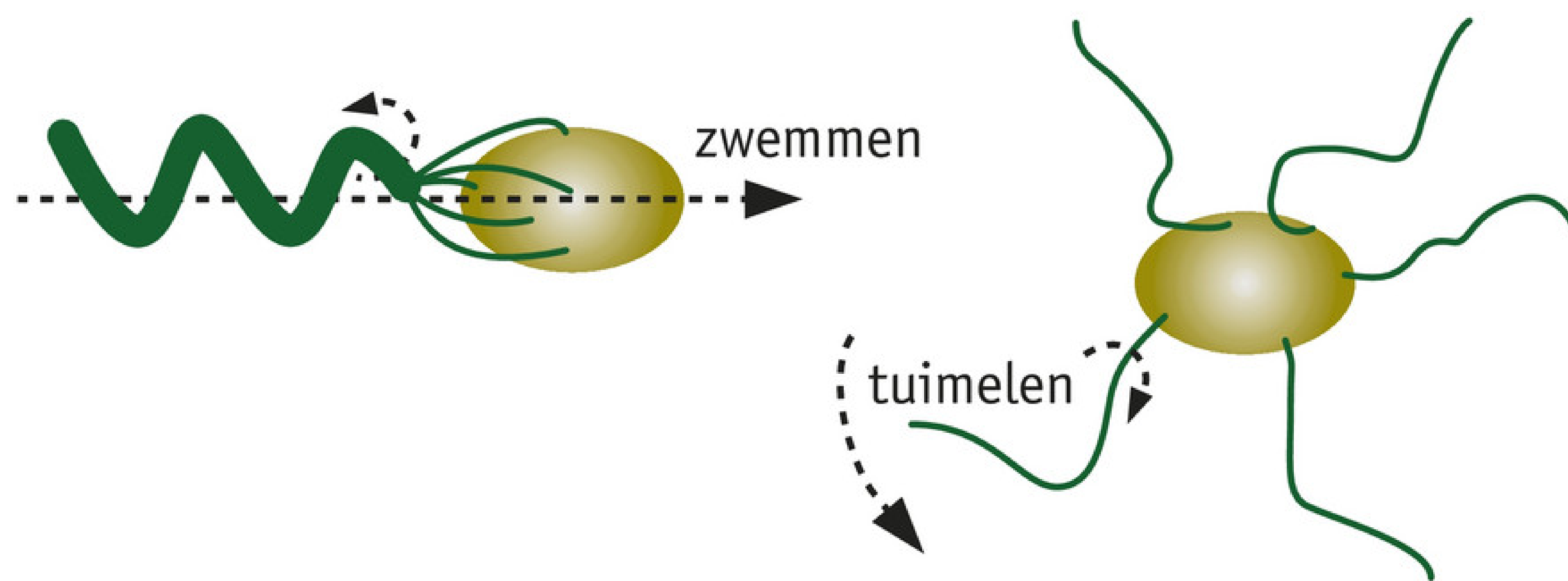
- hoe bacteriën zich voortbewegen.

Een motor is een machine die chemische of elektrische energie gebruikt om een beweging in gang te zetten en te houden. Je komt motoren niet alleen tegen in dingen die door mensen gemaakt zijn, ze zitten ook in levende wezens. Een voorbeeld is de motor die de zweepstaart van bacteriën aandrijft. Biofysici hebben technieken ontwikkeld om de prestaties van deze extreem kleine motoren te bepalen.

Zwemmen en tuimelen

E. coli (voluit *Escherichia coli*) bacteriën komen in enorme aantallen in je darmen voor. Ze worden veel gebruikt voor onderzoek omdat ze gemakkelijk in het laboratorium gekweekt kunnen worden. Biofysici hebben onderzoek gedaan naar de manier waarop dit micro-organisme (lengte exclusief zweepstaarten 2 μm, doorsnede 1 μm) zich voortbeweegt.

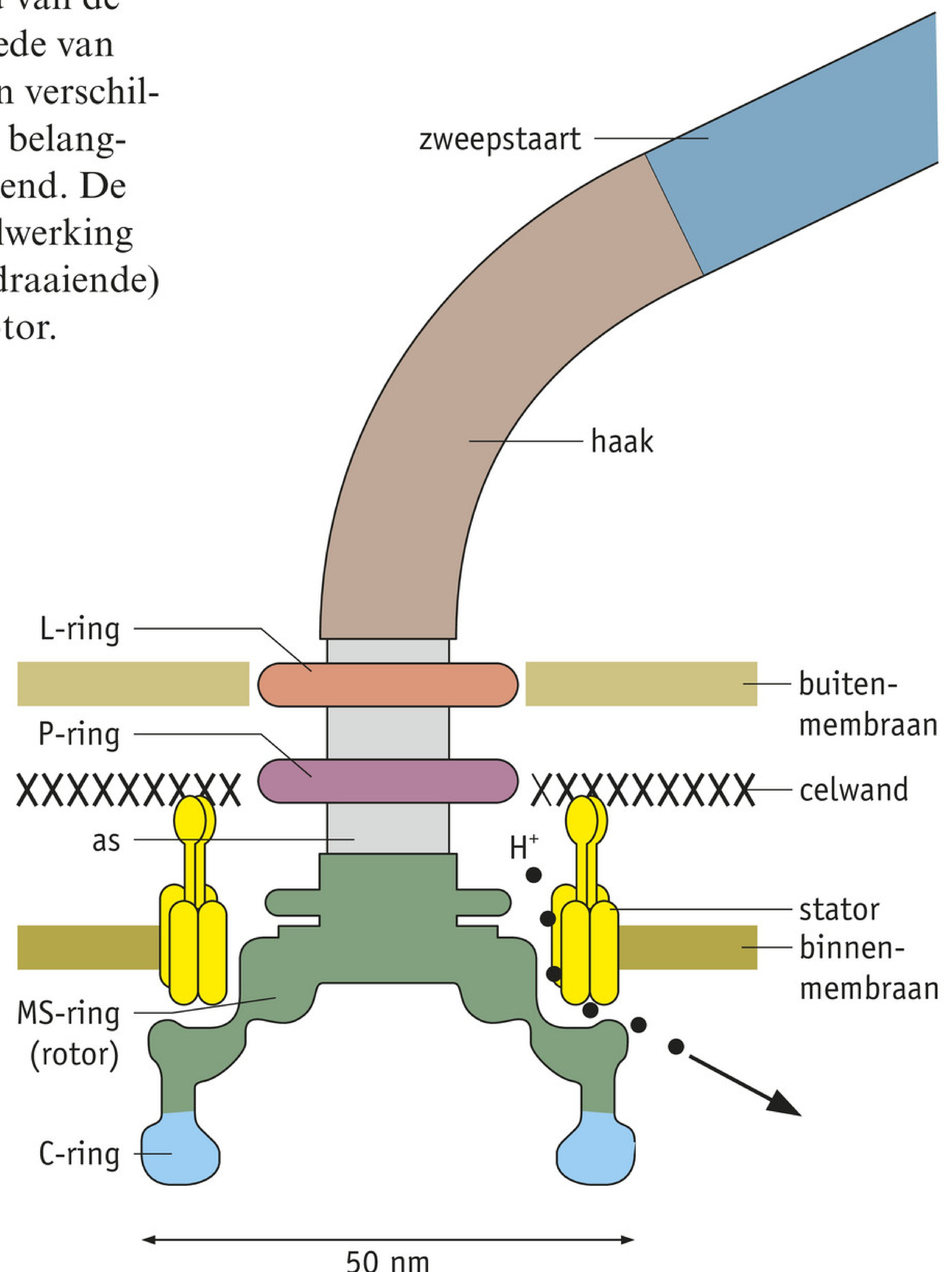
E. colibacteriën zijn goede zwemmers. Ze kunnen zich, zoals veel soorten bacteriën, op eigen kracht verplaatsen door de vloeistof waar ze in leven. De bacterie wordt daarbij voortgestuwd door **zweepstaarten** (flagellen) van 5-10 μm die op verschillende plaatsen uit de cel steken. De spiraalvormige zweepstaarten werken als een soort scheepsschroef: door te draaien genereren ze de stuwkracht die voor de beweging nodig is.
De zweepstaarten draaien afwisselend met de wijzers van de klok mee en ertegenin. Als ze tegen de wijzers van de klok in draaien, vormen ze een bundel die de bacterie in één richting voortstuwt. Dit wordt **zwemmen** genoemd (figuur 16). De bacterie kan hierbij een snelheid bereiken van 50 $\mu m\, s^{-1}$: 25× de eigen lichaamslengte per seconde. Als de zweepstaarten met de wijzer van de klok mee draaien, ontwart de bundel en gaan de zweepstaarten alle kanten op staan. De bacterie draait dan in een cirkel rond. Dit wordt tuimelen genoemd.



▲ **figuur 16** tegen de klok in (links) en met de klok mee (rechts)

De zweepstaartmotor

Elke zweepstaart wordt aangedreven door een motor die verankerd is in de celwand van de bacterie. De motor heeft een doorsnede van 50 nm, en is opgebouwd uit tientallen verschillende moleculen. In figuur 17 zijn de belangrijkste onderdelen schematisch getekend. De motor draait als gevolg van de wisselwerking tussen de (stilstaande) stator en de (draaiende) rotor, net als een ‘gewone’ elektromotor.



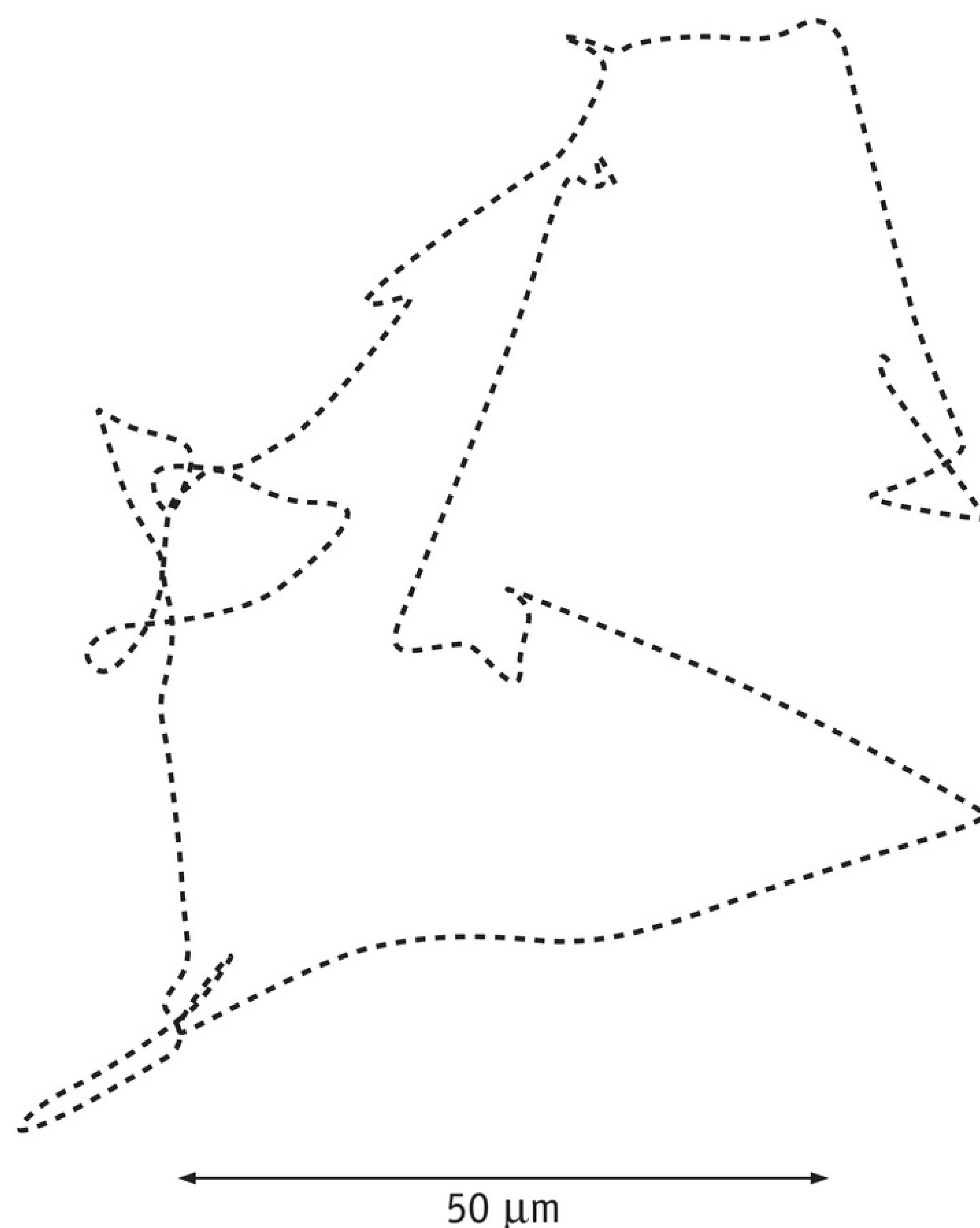
▶ **figuur 17** dwarsdoorsnede van een zweepstaartmotor

Zoals elke elektromotor heeft ook de zweepstaartmotor elektrische energie nodig. De bacterie zorgt daarvoor door positief geladen ionen uit de cel te 'pompen'. Hierdoor ontstaat een elektrochemische spanning over het membraan. Binnen in de cel is de spanning circa 170 mV lager dan daarbuiten. Onder invloed hiervan stromen protonen (H^+) de cel binnen. Bij het passeren van de stator brengen ze de rotor in beweging.
Biofysisch onderzoek heeft veel kennis over de zweepstaartmotor opgeleverd. Een aantal cijfers:

- Bij elke omwenteling van de motor stromen circa 1200 protonen de cel binnen.
- Het toerental van de motor varieert van 0 tot 200 Hz (omwentelingen per seconde).
- Het rendement van de motor is erg hoog, 90-100%, bij toerentallen tot 200 Hz. Bij hogere toerentallen neemt het rendement sterk af.

Biased random walk

Een bacterie kan maar enkele seconden rechtuit zwemmen. Dat komt doordat de bacterie omringd wordt door moleculen die er steeds tegenaan botsen. Soms komen er toevallig meer moleculen vanuit de ene richting dan vanuit de andere, dan wordt de bacterie uit koers geslagen. Op de schaal waarop een bacterie leeft, worden deze toevallige fluctuaties niet 'uitgemiddeld', zoals dat op menselijke schaal wel gebeurt.
Een E. colibacterie beweegt via een grillig traject (figuur 18). Met behulp van een microscoop en een camera is de plaats van de bacterie vastgelegd met tussentijden van 0,1 s. De bacterie zwemt steeds 1 à 2 seconden min of meer rechtuit en tuimelt daarna circa 0,1 s lang. Na een tuimeling zwemt de bacterie weg in een nieuwe richting. De bacterie kan die richting niet zelf kiezen: die is helemaal van het toeval afhankelijk.

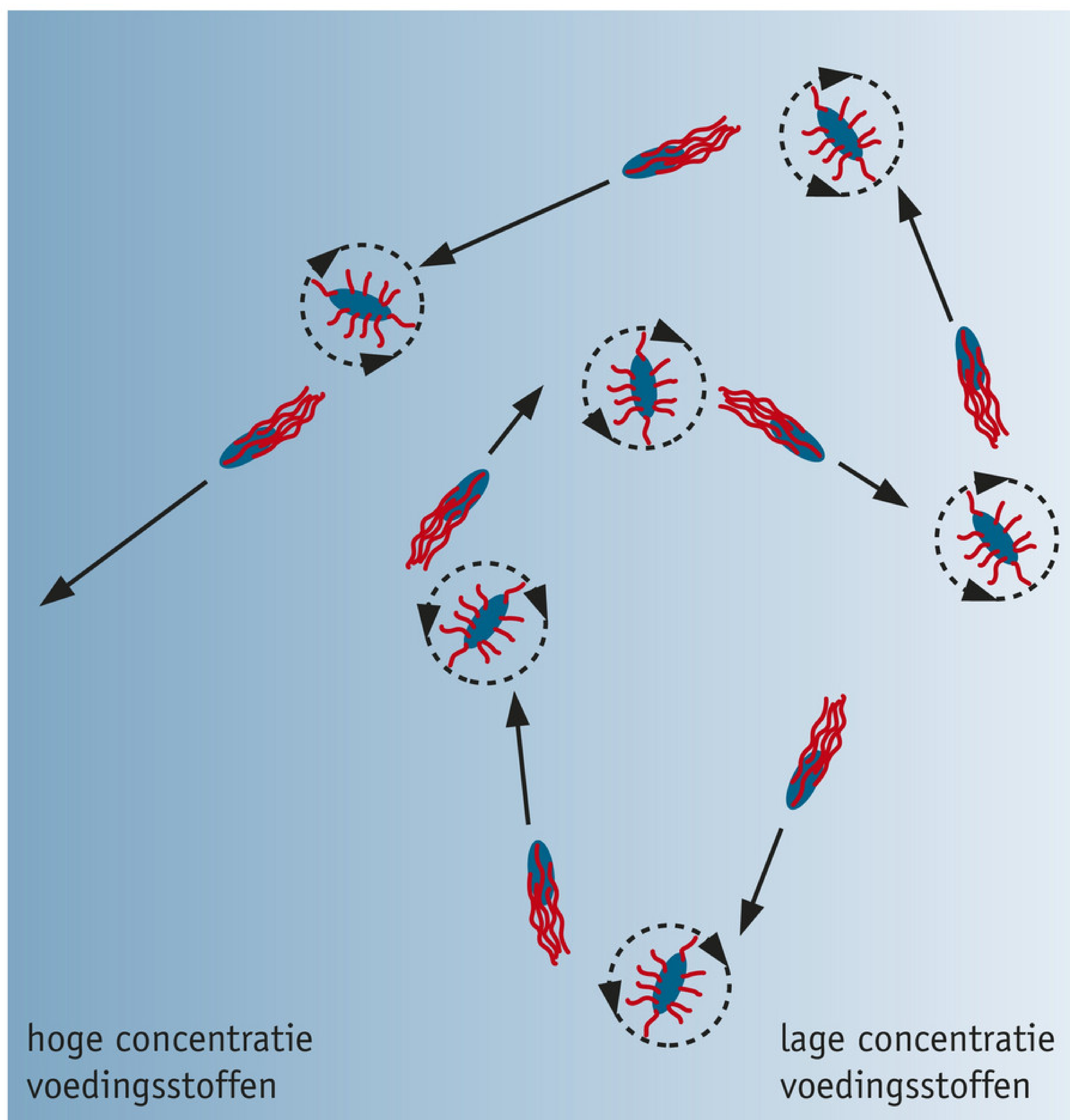


▲ **figuur 18** *biased random walk* van een E. colibacterie

Toch beweegt een bacterie al zwemmend en tuimelend wel een bepaalde kant op. Dat komt doordat de bacterie de lengte van de zwemperiode afstemt op de kwaliteit van de omgeving.

Als de concentratie gunstige stoffen toeneemt of de concentratie schadelijke stoffen afneemt, zwemt de bacterie zo lang mogelijk door. Als het omgekeerde het geval is, stopt de bacterie al gauw met zwemmen en probeert een – willekeurige – nieuwe richting uit. Hierdoor beweegt de bacterie geleidelijk in de richting waar de omstandigheden het beste zijn (figuur 19).
Het resultaat is een traject dat wiskundigen een ***biased random walk*** noemen: een toevalswandeling met een voorkeursrichting. Bij een echte ***random walk*** wordt alles aan het toeval overgelaten: de richtingsverandering en de lengte van elke zwemperiode. Bij een *biased random walk* krijgt één richting een voorkeursbehandeling.

▶ **EXPERIMENT 2** Simulatie van een *biased random walk* (begripspracticum)



▲ **figuur 19** Zo beweegt een bacterie onder invloed van een concentratieverschil.

Onthoud!

- Een E. colibacterie (orde van grootte 1 μm) kan zich door een vloeistof bewegen met behulp van zweepstaarten die werken als een scheepsschroef.
- Als de zweepstaarten tegen de wijzers van de klok in draaien, ‘zwemt’ de bacterie in één richting. Als de zweepstaarten andersom draaien, ‘tuimelt’ de bacterie in een cirkel rond.
- Elke zweepstaart wordt aangedreven door een elektromotor (50 nm). De rotor van deze motor wordt in beweging gebracht door protonen (H^+) die via de stator de cel binnenstromen.
- Een E. colibacterie voert al zwemmend en tuimelend een *biased random walk* uit die ondanks abrupte richtingsveranderingen naar betere leefomstandigheden voert.

Opdrachten

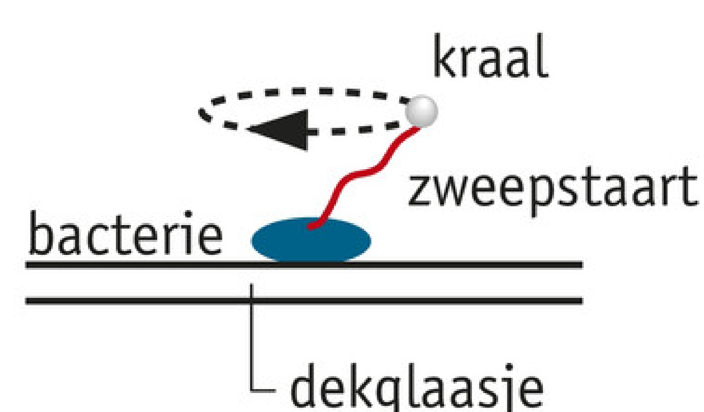
15 Zwemmen
Een redelijk getrainde zwemmer (geen topatleet) haalt een zwemsnelheid van circa 1 m s^{-1} (3,6 km h^{-1}).
a Vergelijk de zwemsnelheid in m s^{-1} van een mens met die van een E. colibacterie, zoals vermeld in de theorie. Wat valt op?
b Bepaal de zwemsnelheid in lichaamslengten per seconde van een mens, en vergelijk de uitkomst met de zwemprestaties van een E. colibacterie. Wat valt op?
c Hoe snel zou een mens bewegen als hij ook een snelheid kon halen van 25 lichaamslengten per seconde?

16 *Biased random walk*
In figuur 18 is de plaats van een E. colibacterie vastgelegd met tussenpozen van 0,1 s.
a Zoek in de figuur een (min of meer) rechtlijnig deel van de beweging. Bepaal de snelheid die de bacterie haalt over dit traject.
b Bepaal de verplaatsing tussen het startpunt en het eindpunt van de beweging.
c Schat de tijd die de bacterie nodig heeft om van het startpunt naar het eindpunt te komen.
d Gebruik de antwoorden op b en c om te berekenen hoe groot de effectieve snelheid van de bacterie is.

17 Dronkemanswandeling
Een dronken persoon zet stappen in een willekeurige richting: hij voert een *random walk* uit. Bedenk een situatie waarbij dit een *biased random walk* is.

18 Vermogen
Bij elke omwenteling van de zweepstaartmotor stromen circa 1200 protonen de cel binnen, onder invloed van een spanning van 170 mV.
a Hoe groot is de totale lading die dan de cel instroomt?
b Bereken de stroom door de motor bij een toerental van 100 Hz. Tip: de lading Q ken je al. Hoe groot is de bijbehorende tijd t?
c Bereken het elektrisch vermogen van de motor.

19 Draaien
Biofysici voeren experimenten uit waarbij ze de zweepstaart van een bacterie afbreken en een kunststof microkraal aan het overgebleven stompje plakken. Vervolgens meten ze de positie van de kraal, terwijl die door de zweepstaart in een cirkel wordt rondgeslingerd (figuur 20).
Bij een meting maakt de kraal 100 omwentelingen per seconde. De kraal beschrijft bij elke omwenteling een cirkel met een straal van 800 nm.
a Bereken de snelheid van de kraal in m s^{-1}.
b Bereken de wrijvingskracht op de kraal met de formule $F_w = -b \cdot v$. De constante b is bij deze meting gelijk aan $9{,}4 \cdot 10^{-9}$ kg s^{-1}.



▲ **figuur 20** experiment waarbij een bacterie een microkraal rondslingert

Bij een constant toerental is de kracht die de zweepstaart op de kraal uitoefent even groot als de wrijvingskracht (maar tegengesteld gericht).

c Leg uit waarom dat het geval is.

20 Rendement

Bij een experiment worden het opgenomen vermogen en het nuttig geleverde vermogen van een zweepstaartmotor bepaald. Bij één meting is het opgenomen vermogen $3{,}1 \cdot 10^{-15}$ W en het nuttig vermogen $2{,}7 \cdot 10^{-15}$ W.

Bereken het rendement van de zweepstaartmotor.

4 Nanowetenschap

In deze paragraaf leer je:

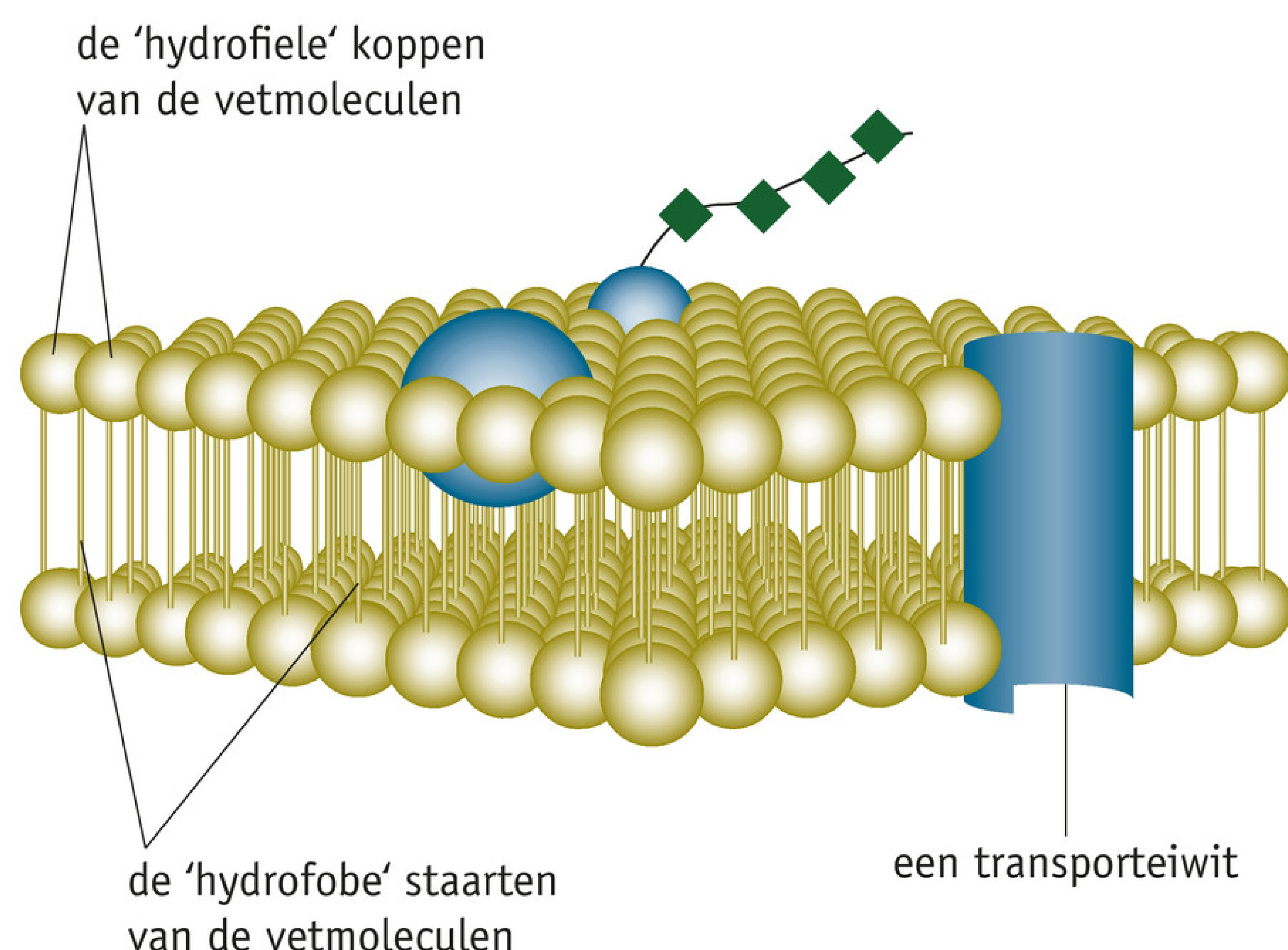
- op welke twee manieren moleculen cellen in- en uitgaan;
- met welke methoden transport van DNA wordt onderzocht.

Veel verschijnselen die voor biofysici interessant zijn, spelen zich af op nanoschaal: een factor 10^9 kleiner dan een mens, een hond, een fiets of een stoel. Dit is de schaal waarop de processen in een cel zich afspelen. Wil je weten hoe het leven werkt, dan moet je onderzoeken hoe de wereld er op nanoschaal uitziet.

Het celmembraan

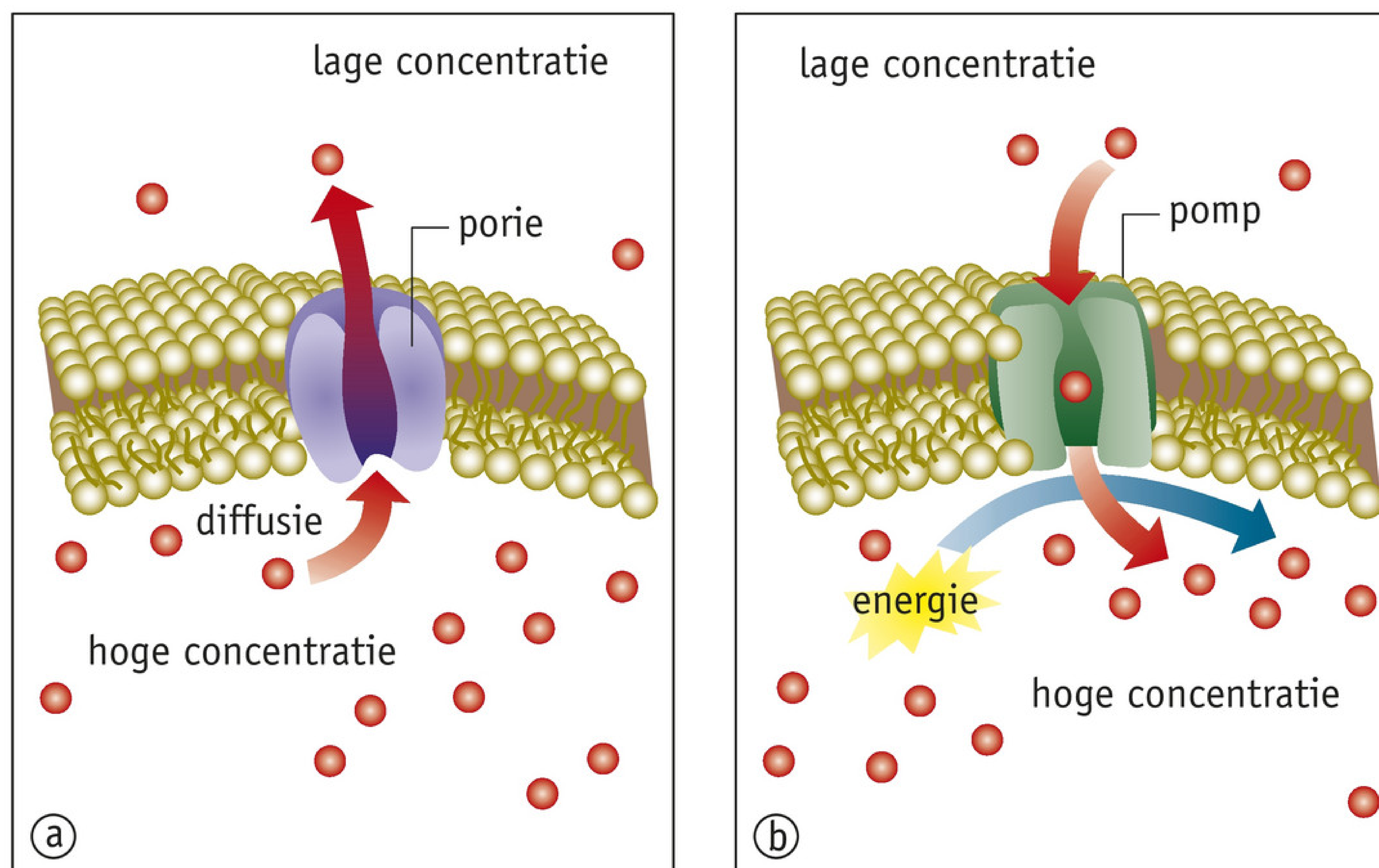
Het menselijk lichaam bestaat naar schatting uit 10^{14} cellen. Al die cellen hebben een celmembraan: een 5 nm dik vlies dat de inhoud van de cel – het cytoplasma – scheidt van de wereld buiten de cel. Het celmembraan is opgebouwd uit een dubbele laag vetmoleculen waarvan de hydrofiele koppen naar buiten wijzen, en de hydrofobe staarten naar binnen (figuur 21).

De krachten tussen de vetmoleculen zijn zo groot dat andere moleculen zich er moeilijk tussen kunnen dringen. Alleen enkele kleine moleculen, zoals zuurstof (O_2) en koolstofdioxide (CO_2), kunnen het celmembraan op eigen kracht passeren. Om het transport van andere moleculen mogelijk te maken, bevat het membraan speciale transporteiwitten die poriën en pompen genoemd worden.



▲ **figuur 21** het celmembraan

Een **porie** is een transporteiwit dat functioneert als een kanaal: een buisje dat op maat gemaakt is voor een of meer soorten moleculen. Als de concentratie van deze moleculen buiten de cel hoger is dan daarbinnen, stromen ze via dit kanaal de cel in. In het omgekeerde geval stromen ze via dezelfde opening de cel uit. Dat gaat vanzelf: doordat moleculen onophoudelijk bewegen, verspreiden ze zich vanzelf van de plek met de hoogste naar de plek met de laagste concentratie. Je noemt dit **passief transport** of transport door **diffusie** (figuur 22a).



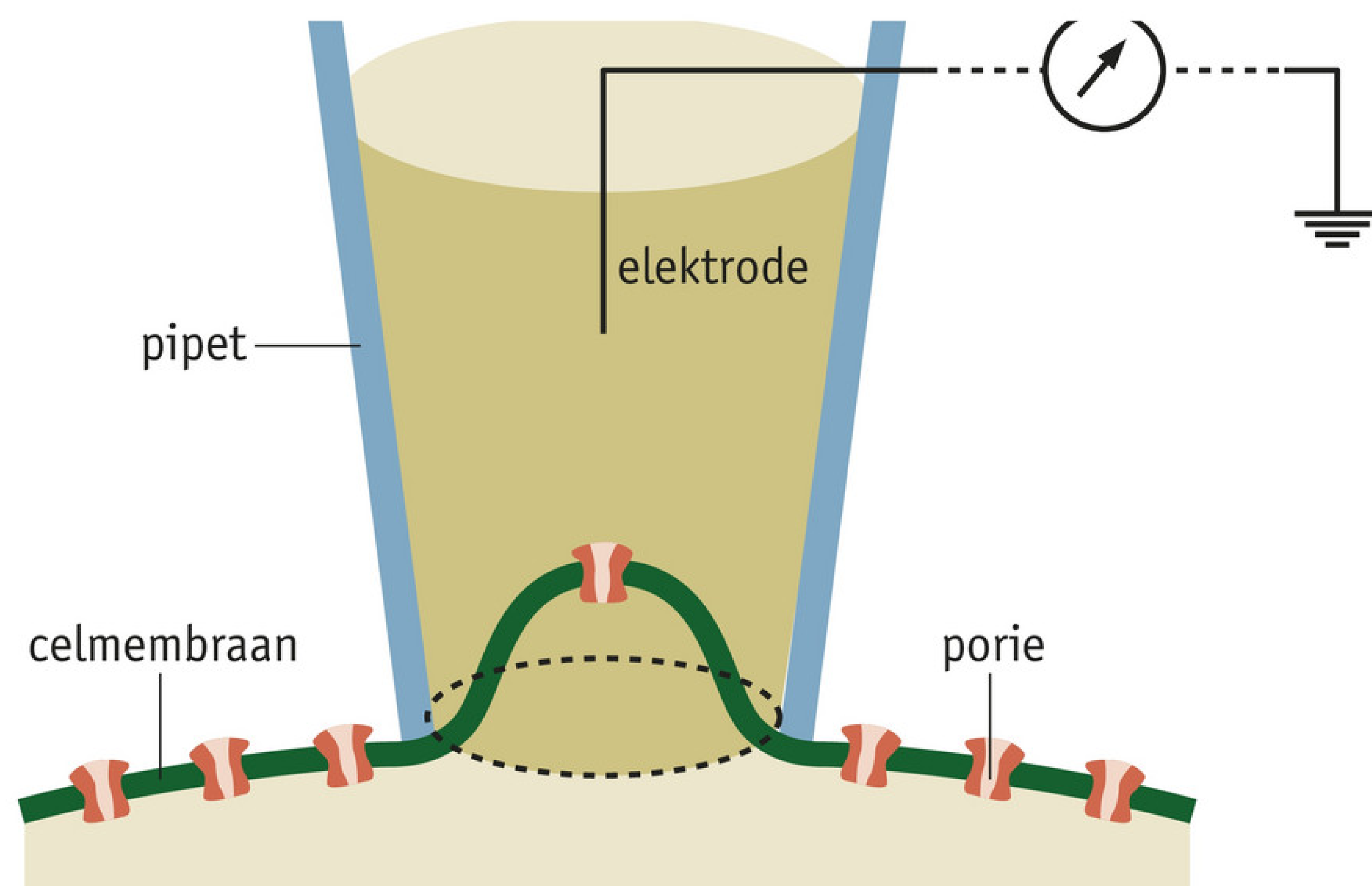
▲ **figuur 22** transport door diffusie (a) en actief transport (b)

Een **pomp** is een transporteiwit dat moleculen in de tegenovergestelde richting vervoert: van de plaats met de laagste naar de plaats met de hoogste concentratie. Dit heet **actief transport**, omdat deze beweging niet vanzelf gaat (figuur 22b). Het transporteiwit heeft chemische energie nodig om een molecuul te vervoeren tegen het concentratieverschil in (net zoals een waterpomp elektrische energie nodig heeft om water op te pompen van laag naar hoog).

Diffusie van ionen

Voor de diffusie van moleculen is het concentratieverschil de enige bepalende factor. Dat is anders voor ionen, die ook een belangrijke rol in de cel hebben. Denk bijvoorbeeld aan de H^+-ionen die de krachtbron vormen voor de zweepstaartmotor. Ionen gedragen zich anders dan moleculen, doordat ze een elektrische lading hebben. Daardoor is er bij de diffusie van ionen naast het concentratieverschil nog een tweede factor van belang: de elektrische spanning over het celmembraan.

Er staat een spanning over het celmembraan doordat transporteiwitten positieve ionen zoals Na^+ de cel uit pompen. De vloeistof buiten de cel is daardoor positiever dan de vloeistof in de cel. Dat zorgt voor een elektrische kracht op de ionen in de vloeistof: bij positieve ionen werkt die kracht de cel in, bij negatieve ionen de cel uit. Deze elektrische kracht kan ionen door poriën in het celmembraan laten bewegen, net zoals dat gebeurt door een concentratieverschil.

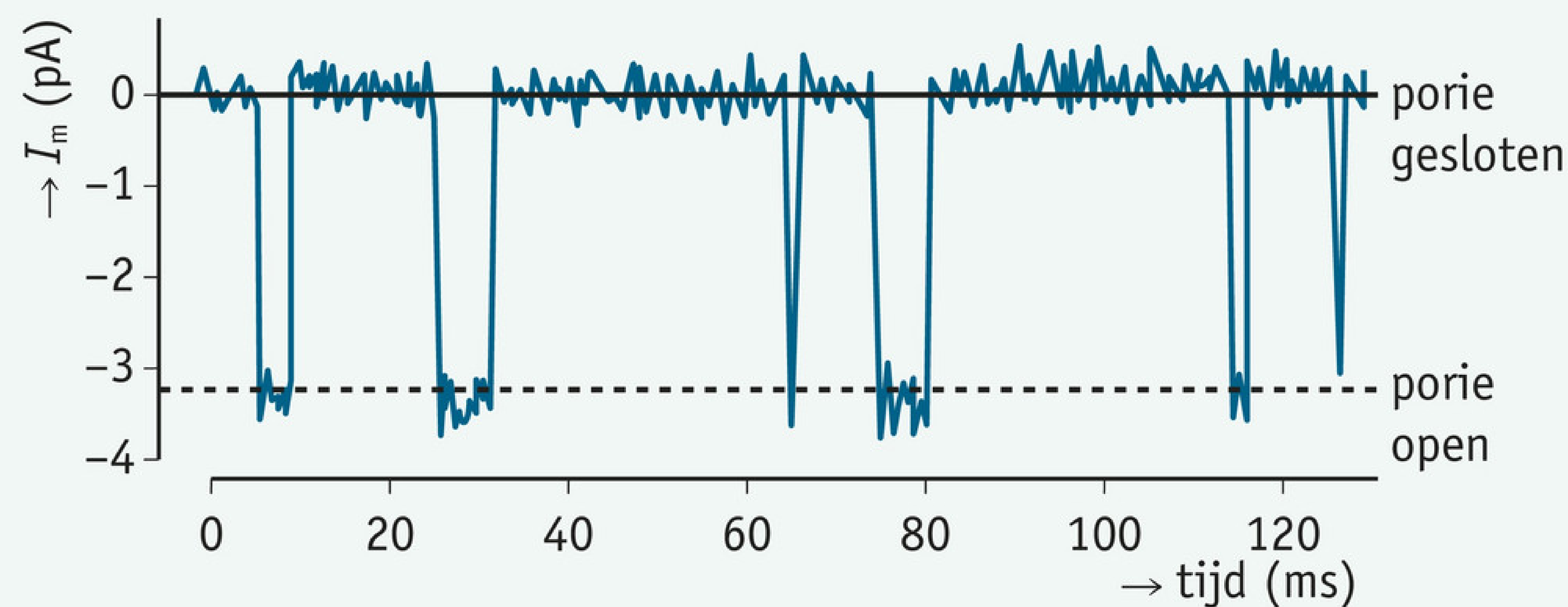


▲ **figuur 23** de ionenstroom meten met een *patch clamp*

Onderzoekers hebben verschillende technieken ontwikkeld om het transport van ionen door het celmembraan te onderzoeken. Bij de *patch-clamp*-techniek wordt een micropipet met een extreem dunne punt op het celmembraan gezet (figuur 23). Doordat er in de pipet een lichte onderdruk heerst, wordt het membraan een eindje de pipet ingezogen. Onder de opening in de pipet bevindt zich dan een klein stukje membraan met één of hoogstens enkele poriën. Met behulp van een elektrode in de pipet kan de onderzoeker vervolgens de ionenstroom door de poriën meten.

Voorbeeldopgave 1

In figuur 24 zie je een grafiek van de ionenstroom door een porie in het membraan van een spiercel. Je ziet dat de porie niet de hele tijd openstaat, maar afwisselend open- en dichtgaat. De ionenstroom bestaat uit positieve ionen met een lading van $+e$.
Schat hoeveel ionen per seconde de porie passeren.



▲ **figuur 24** ionenstroom door één enkele porie

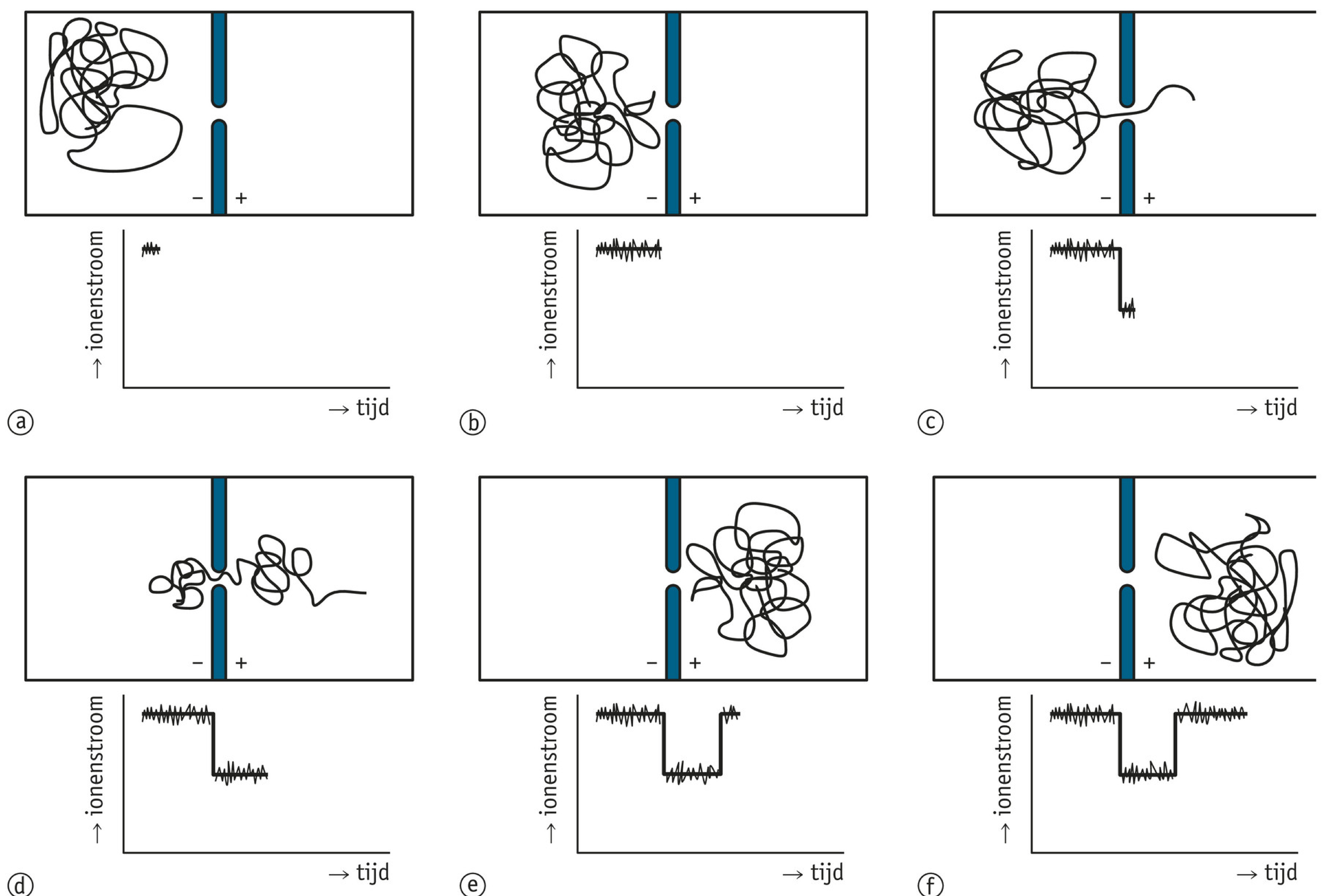
Uitwerking
Als een porie openstaat, is de stroomsterkte –3,2 pA = $-3{,}2 \cdot 10^{-12}$ A (het minteken voor 3,2 geeft alleen de richting van de stroom aan; je mag het in het vervolg negeren). Als de porie steeds open zou staan, zou het aantal ionen per seconde uitkomen op: $\dfrac{3{,}2 \cdot 10^{-12}}{1{,}60 \cdot 10^{-19}} = 2{,}0 \cdot 10^{7}$.

De porie staat circa 15% van de tijd open (geschat op basis van figuur 24). Er bewegen dus 15% van $2{,}0 \cdot 10^{7} = 3{,}0 \cdot 10^{6}$ ionen per seconde door de porie.

Nanoporiën en DNA

Biofysici hebben zich door het celmembraan laten inspireren om experimenten te doen met kunstmatige membranen. In figuur 25 zie je een voorbeeld van zo'n experiment. De onderzoekers hebben een 20 nm dik membraan gemaakt van siliciumnitride (SiN), een materiaal dat sterk en taai genoeg is om er zo'n dun vlies van te maken. Daarna hebben ze een gaatje in het membraan geboord met een dunne bundel elektronen. Het resultaat is een **nanoporie**: een kleine opening met een doorsnede van enkele nanometers (in figuur 25 niet op schaal getekend).
De onderzoekers hebben de ruimten aan weerszijden van het membraan gevuld met een geleidende oplossing. Met twee elektroden is een spanning over het membraan gelegd. Daardoor stromen er voortdurend ionen door de nanoporie heen. De grootte van de elektrische stroom wordt continu gemeten. De oplossing bevat verder nog een aantal negatief geladen DNA-moleculen die als lange verwarde slierten in de vloeistof zweven.

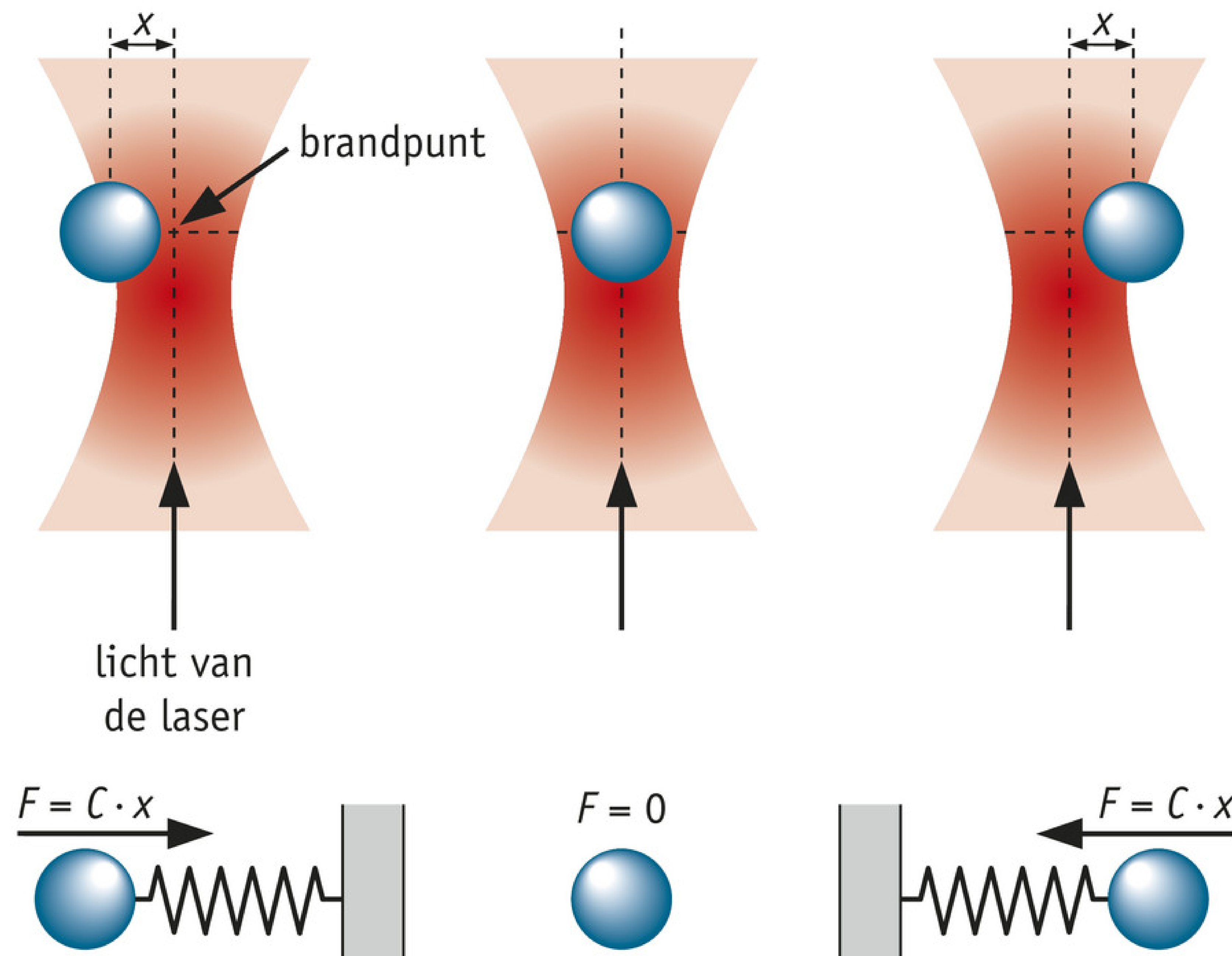
Als een sliert DNA in de buurt van de nanoporie komt, wordt hij door elektrische krachten in de opening getrokken (figuur 25a-c). Hierdoor wordt de nanoporie gedeeltelijk geblokkeerd. De ionenstroom door de porie neemt dan ineens flink af. Het DNA-molecuul beweegt vervolgens door de nanoporie heen, naar de andere kant van het membraan (figuur 25c-e). Uit de manier waarop de ionenstroom ondertussen op en neer gaat, kunnen de onderzoekers eigenschappen afleiden van het DNA-molecuul. De techniek is bijvoorbeeld gebruikt om de plaats te vinden waar eiwitten aan het DNA binden.



▲ **figuur 25** experiment waarbij DNA door een nanoporie wordt getrokken

Moleculen manipuleren met een optisch pincet

Het is mogelijk om een DNA-molecuul vast te maken aan een microkraal: een glazen of kunststof bolletje met een diameter van 1-5 μm. Zo'n microkraal kun je beetpakken en verplaatsen met een apparaat dat een optisch pincet wordt genoemd (figuur 26). Op die manier kun je een DNA-molecuul heel gecontroleerd door een nanoporie heen laten bewegen. Ook is het mogelijk om de krachten op het DNA-molecuul te meten, terwijl het door de nanoporie heen beweegt.



▲ **figuur 26** optisch pincet

Een optisch pincet produceert een intense, sterk gefocuste lichtbundel. In het brandpunt van zo'n lichtbundel kun je een klein, doorzichtig voorwerp gevangen houden. Als zo'n voorwerp bij het brandpunt vandaan beweegt, oefent het licht een kracht uit die het voorwerp weer terug laat bewegen, naar het brandpunt toe. De kracht F op het voorwerp is evenredig met de afstand x tot het brandpunt: $F = C \cdot x$. Het lijkt daarom alsof het voorwerp vastzit aan een veer die uitrekt als het voorwerp bij het brandpunt vandaan beweegt (figuur 26).
De lichtbundel van een optisch pincet kan heel nauwkeurig gestuurd worden. Een onderzoeker kan een microkraal in stappen van enkele nanometers laten bewegen, naar een nanoporie toe of daarbij vandaan. Om de plaats van de microkraal vast te stellen, wordt gebruikgemaakt van laserlicht dat door de kraal wordt gereflecteerd naar een microscoop. Op basis van de reflecties kan worden nagegaan waar de kraal zich bevindt.

Onthoud!

- Het celmembraan bevat twee soorten transporteiwitten: poriën waardoor passief transport plaatsvindt (door diffusie) en pompen waardoor actief transport plaatsvindt.
- Moleculen verplaatsen zich door hun beweging 'vanzelf' van de plaats met de hoogste naar de plaats met de laagste concentratie. Dit wordt diffusie genoemd.
- Voor de diffusie van ionen in een vloeistof is niet alleen het concentratieverschil van belang (zoals bij moleculen), maar ook de elektrische spanning tussen delen van de vloeistof.
- Biofysici gebruiken kunstmatige membranen waarin nanoporiën zijn geboord, om de eigenschappen van moleculen zoals DNA te onderzoeken.
- Met een optisch pincet kunnen doorzichtige voorwerpen gemanipuleerd worden die zich in het brandpunt van een intense lichtbundel bevinden. De kracht op het voorwerp is evenredig met de afstand x tot het brandpunt: $F = C \cdot x$

Opdrachten

21 Zuurstof bij lopen

Als je loopt verbruik je zuurstof bij de chemische reacties in cellen. Toch krijgen de cellen geen gebrek aan zuurstof, zolang ze in een zuurstofrijke omgeving blijven.

a Welk natuurkundig proces zorgt ervoor dat zo'n cel voortdurend van nieuwe zuurstof wordt voorzien?

b Hoe komt het dat dit proces 'vanzelf' verloopt, zonder dat de cel hieraan energie hoeft te besteden?

22 Pomp

Voor veel biologische processen is het van belang dat de Na^{+}-concentratie in de cel lager is dan daarbuiten. Het celmembraan bevat daarom een transporteiwit dat dit concentratieverschil in stand houdt: de natrium-kaliumpomp.

a Leg uit waarom een concentratieverschil wel in stand kan worden gehouden door een pompeiwit, maar niet door een porie-eiwit.

b In welke richting vervoert de natrium-kaliumpomp de Na^{+}-ionen: van binnen de cel naar buiten of van buiten de cel naar binnen? Licht je antwoord toe.

In 1960 werd ontdekt dat de natrium-kaliumpomp vijf ionen tegelijk vervoert: voor elke drie Na^{+}-ionen die de ene kant op worden gebracht, bewegen er twee K^{+}-ionen in de tegenovergestelde richting.

c Wat is het netto-effect van dit transport op de spanning over het celmembraan?

23 Rek

In skeletspieren bevinden zich zintuigcellen die de rek van de spier kunnen waarnemen. Deze cellen reageren op de rekspanning in de spier. Hoe groter die rekspanning, des te langer staan bepaalde poriën in het celmembraan open.

In figuur 27 zie je de grafieken van drie metingen waarbij de ionenstroom door zo'n porie werd gemeten.

a Hoeveel ms duurde het weergegeven deel van de metingen?

b Welke grootheid werd bij dit experiment gemeten in kPa?

c Bij welke meting was de spier het verst uitgerekt? Waaraan zie je dat?

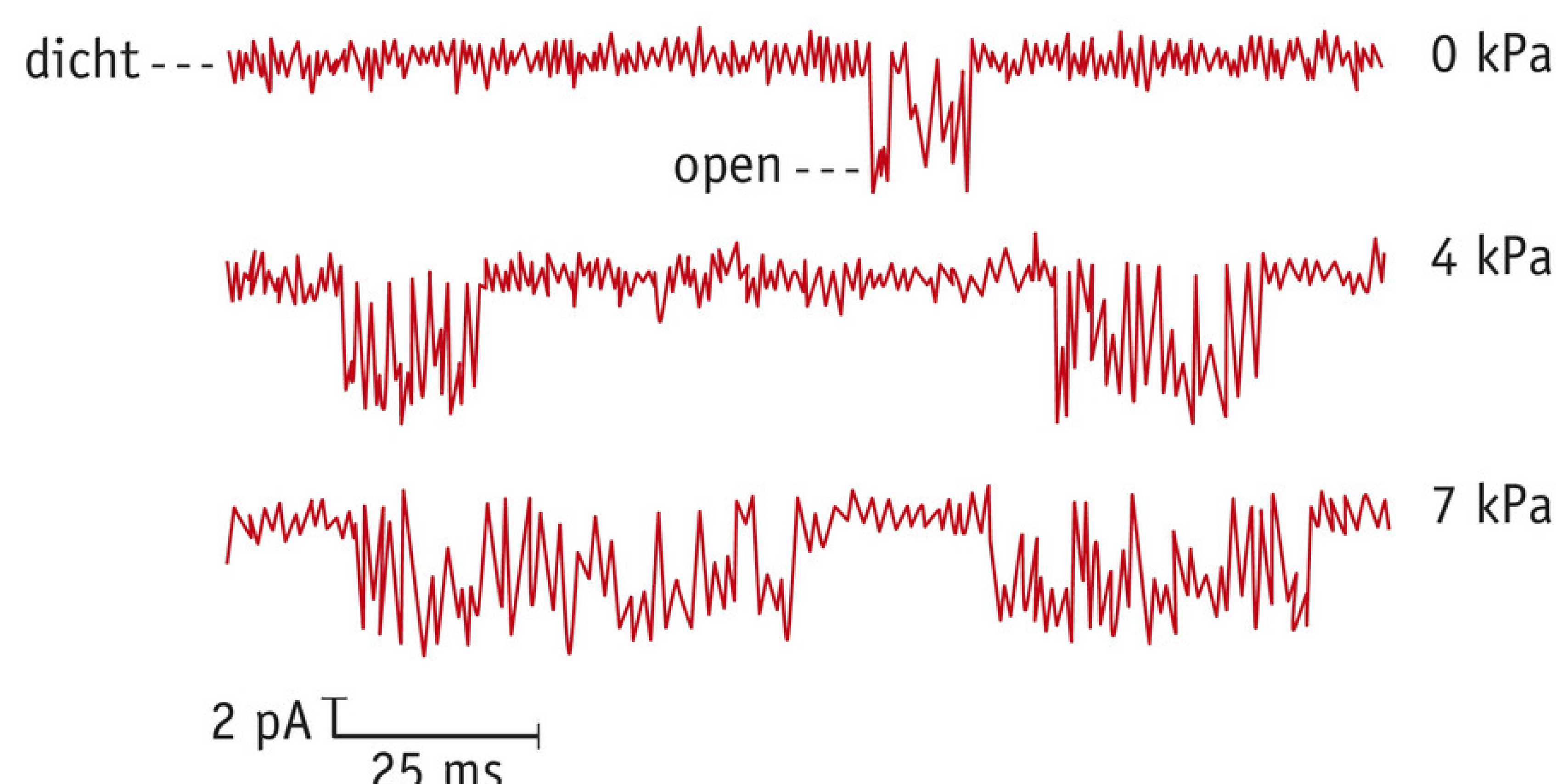
d Schat hoeveel procent van de tijd de porie openstond:
- bij de eerste meting;
- bij de tweede meting;
- bij de derde meting.

Als een porie openstaat, loopt er uiteraard meer stroom doorheen dan wanneer de porie dicht is. Toch gaat de grafiek bij een open porie naar beneden in plaats van omhoog.

e Leg uit waar dat aan ligt.

f Hoe groot wordt de stroomsterkte als de porie openstaat?

g Welke conclusie kun je trekken over de manier waarop de zintuigcel werkt?



◀ **figuur 27** drie metingen aan een porie in het celmembraan van een zintuigcel

24 Stroom

Bij een experiment bewegen twee soorten ionen door een nanoporie. Per seconde stromen $2{,}1 \cdot 10^8$ ionen met een lading van $-e$ van links naar rechts en $4{,}2 \cdot 10^8$ ionen met een lading van $+2e$ van rechts naar links.

a Bereken de totale stroomsterkte door de porie in pA.

In de natuurkunde loopt een elektrische stroom per definitie van plus naar min, ook al bewegen de ladingdragende deeltjes vaak net de andere kant op.

b Hoe zit dat in het experiment in deze opgave: loopt de stroom van links naar rechts of van rechts naar links?

25 Nanoporie

Bij het experiment dat in figuur 25 getekend is, beweegt er met tussenpozen een DNA-molecuul door de nanoporie. Om het passeren van zo'n molecuul te detecteren, wordt de ionenstroom door de nanoporie voortdurend gemeten.

a Hoe kun je aan de meetresultaten zien dat er een DNA-molecuul door de porie beweegt?

b Hoe kun je aan de meetresultaten zien hoelang het DNA-molecuul zich in de porie bevindt?

Een onderzoeker kan eiwitten op bepaalde plaatsen aan een DNA-molecuul laten binden. Je krijgt dan slierten DNA met hier en daar verdikkingen op de plaatsen waar een eiwit aan het DNA vastzit.

c Hoe kun je aan de meetresultaten zien waar de eiwitten zich aan het DNA hebben gebonden?

Soms gebeurt het dat twee uiteinden van een DNA-molecuul tegelijk de nanoporie worden ingetrokken. Het molecuul passeert de porie dan in gedeeltelijk dubbelgeslagen toestand.

d Hoe kun je dat aan de meetresultaten zien?

26 Optisch pincet

Een optisch pincet wordt in het Engels *optical tweezers* of een *optical trap* (optische val) genoemd. Onderzoekers moeten voor elke meting eerst de *trap stiffness* bepalen: dat is C in de formule $F = C \cdot x$. De *trap stiffness* C geeft aan hoe stug de denkbeeldige veer is die de gebruikte microkraal terugtrekt naar het brandpunt.

Bij een experiment wordt een optisch pincet gebruikt met een *trap stiffness* van 250 pN per µm.

a Bereken hoe groot de kracht op de kraal wordt, als die 100 nm bij het brandpunt vandaan wordt bewogen.

b Bereken hoe groot de afstand tot het brandpunt is als het optische pincet een kracht van 50 pN op de kraal uitoefent.

+27 Kraal

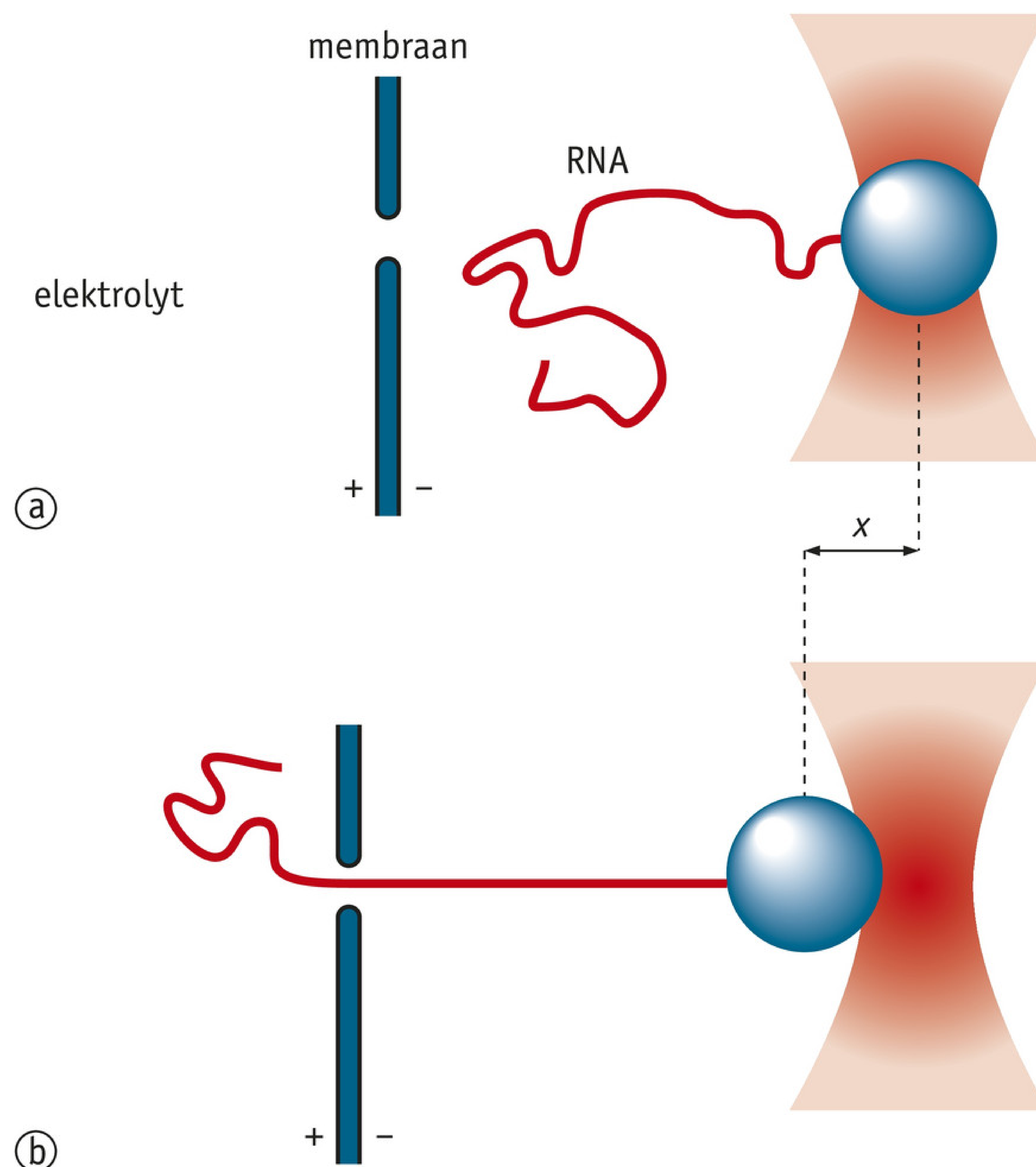
In figuur 28 zie je een experiment met een dubbele streng RNA die aan één kant vastzit aan een microkraal. De kraal bevindt zich in situatie a in het brandpunt van een optisch pincet. Het RNA wordt daarna door elektrische krachten een nanoporie ingetrokken. De kraal beweegt daardoor een eindje in de richting van de nanoporie. In situatie b is er evenwicht ontstaan en bewegen het RNA en de microkraal niet meer.

a Welke twee krachten houden elkaar in situatie b in evenwicht?

In situatie b bevindt de kraal zich op een afstand $x = 64$ nm van het brandpunt. Het optisch pincet heeft een *trap stiffness* van 135 pN per µm.

b Bereken de kracht die het optisch pincet in deze situatie op de kraal uitoefent.

c Wat kun je in situatie b zeggen over de grootte en de richting van de elektrische kracht op het RNA-molecuul?



▲ **figuur 28** experiment met RNA

Over het membraan staat in situatie b een spanning van 100 mV.

d Beschrijf wat er zal gebeuren als de onderzoeker de spanning terugbrengt tot 75 mV.

Eindopdracht

28 Lopen op macro- en microschaal

Bij lage snelheden wandelen mensen, bij hoge snelheden rennen ze. De overgang vindt plaats als het getal van Froude, $Fr = \frac{v^2}{g \cdot l}$, gelijk is aan 0,5.

a Leg aan de hand van de formule uit of mensen wandelen bij een hoog of bij een laag getal van Froude.

b Laat zien dat het getal van Froude dimensieloos is, dus dat het geen eenheid heeft.

c Leg uit dat een lange man met beenlengte 1,1 m bij een relatief hoge snelheid overgaat van wandelen op rennen.

Met de zoekterm '*inner life of a cell*' vind je op YouTube een animatie gemaakt door Harvard University. In de volledige versie zie je rond 5 minuut 40 een motoreiwit stappen maken langs een microtubulus. De lengte van de 'poten' is van de orde van grootte van 10^{-8} m.

d Geef twee argumenten voor de redelijkheid van deze schatting. Ga ervan uit dat de bolletjes die je ziet atomen zijn.

e Leg uit hoe je met behulp van het getal van Froude zou kunnen beargumenteren dat deze loopbeweging van een motoreiwit langzaam gaat.

f Leg uit in welk opzicht het getal van Froude wel van toepassing is op het lopen van het motoreiwit en in welk opzicht niet.

g Leg uit op welke manier je een aanpassing aan het getal van Froude zou kunnen maken, opdat het toch van toepassing is op lopende motoreiwitten.

Maak de online diagnostische toets (Test jezelf).

5 Practicum

EXPERIMENT 1 Videometing van een loopbeweging (onderzoekspracticum)

Inleiding
Je kunt video's van lopende mensen gebruiken om de loopbeweging te analyseren. Bij dit experiment ga je zelf zo'n onderzoek uitvoeren. Je kunt de beelden analyseren met Coach, of een gratis programma zoals Tracker. De opnamen kun je zelf maken of opzoeken op internet, met zoekwoorden als 'walking cycle' of 'gait cycle'.

Onderzoeksvraag
Hieronder staan vier suggesties voor een onderzoek, maar je kunt ook zelf een onderzoeksvraag bedenken.

a Als je loopt, zwaaien je armen heen en weer. Onderzoek of de armen daarbij een slingerbeweging uitvoeren. Geef in de videobeelden de positie van de schouder en de positie van de hand aan en laat de computer de verschilgrafiek van beide posities bepalen. Als de verschilgrafiek een sinusfunctie laat zien, geeft dat aan dat de armen als slingers bewegen.

b Mensen compenseren verstoringen in hun loopcyclus door hun voeten slim neer te zetten. Maak opnamen van een proefpersoon die naar de camera toe loopt en onverwacht een duwtje (voorzichtig!) van opzij krijgt. Analyseer de manier waarop de verstoring wordt gecorrigeerd.

c Als mensen rennen, bewegen ze op een andere manier dan wanneer ze lopen. Onderzoek de verschillen tussen deze twee manieren van bewegen met behulp van videobeelden. Kijk naar het contact met de grond, de stapfrequentie, de staplengte en de verticale beweging van het lichaam.

d Als je loopt met een flink blok aan één been, verandert je loopbeweging. Maak opnamen van je manier van lopen, met en zonder blok, en onderzoek wat er precies verandert. Kijk in elk geval naar de stapfrequentie, de staplengte en de symmetrie van de beweging.

Benodigdheden
geschikte camera; computer met software voor videometen, zoals Coach

Uitvoering
- Zoek geschikte opnamen op internet of maak ze zelf. Let in het laatste geval altijd goed op de veiligheid. Vraag van tevoren om advies als je ook maar enigszins twijfelt.
- Tip 1: je krijgt de beste opnamen als je de camera op een statief zet. Als dat niet mogelijk is, zet de camera dan op een tafel of een ander vast punt.
- Tip 2: een loopbeweging is veel gemakkelijker te filmen als de proefpersoon op een loopband loopt. Misschien kun je via een sportschool iets regelen.
- Controleer altijd of je voldoende bruikbare opnamen hebt voor je het experiment beëindigt. Je kunt beter een opname te veel maken dan achteraf alles opnieuw moeten doen.

Verwerking

Schrijf een onderzoeksverslag met in elk geval de volgende onderdelen:
- onderzoeksvraag
- onderzoeksopzet
- meetresultaten
- bespreking en conclusies

EXPERIMENT 2 Simulatie van een *biased random walk* (begripspracticum)

Inleiding
Bij deze simulatie laat je een pion een *random walk* maken, met en zonder *bias*. Je kunt de simulatie uitvoeren met een papieren bord, een pion als bacterie en een dobbelsteen als *random-getallengenerator*. Je kunt deze simulatie ook op de computer uitvoeren.

Onderzoeksvraag
Hoe verschilt een *biased random walk* (een toevalswandeling met voorkeursrichting) van een echte *random walk* (zonder voorkeursrichting)?

Benodigdheden
speelveld; pion; dobbelsteen; potlood; blauwe pen; rode pen

Uitvoering
***Ronde 1** Biased random walk*
Gebruik een speelveld vol zeshoekige vakjes (figuur 29).
Laat de pion hierop tien keer een *biased random walk* maken. Spelregels:

1. Zet de pion in het vakje middenin dat is gemerkt met een S (van Start).
2. Gooi met de dobbelsteen en verzet de pion als volgt:
   bij een 1: drie vakjes naar rechtsboven;
   bij een 2: twee vakjes naar rechts;
   bij een 3: één vakje naar rechtsonder;
   bij een 4: één vakje naar linksonder;
   bij een 5: twee vakjes naar links;
   bij een 6: drie vakjes naar linksboven.
3. Laat de pion weerkaatsen als die de linker- of rechterrand van het speelveld raakt (volgens de regel: hoek van inval = hoek van terugkaatsing).
4. Stop na tien keer gooien of wanneer de pion de bovenrand of onderrand bereikt. Markeer de slotpositie van de pion met blauw.
5. Herhaal de stappen 1 tot en met 4, totdat je tien slotposities hebt gemarkeerd.

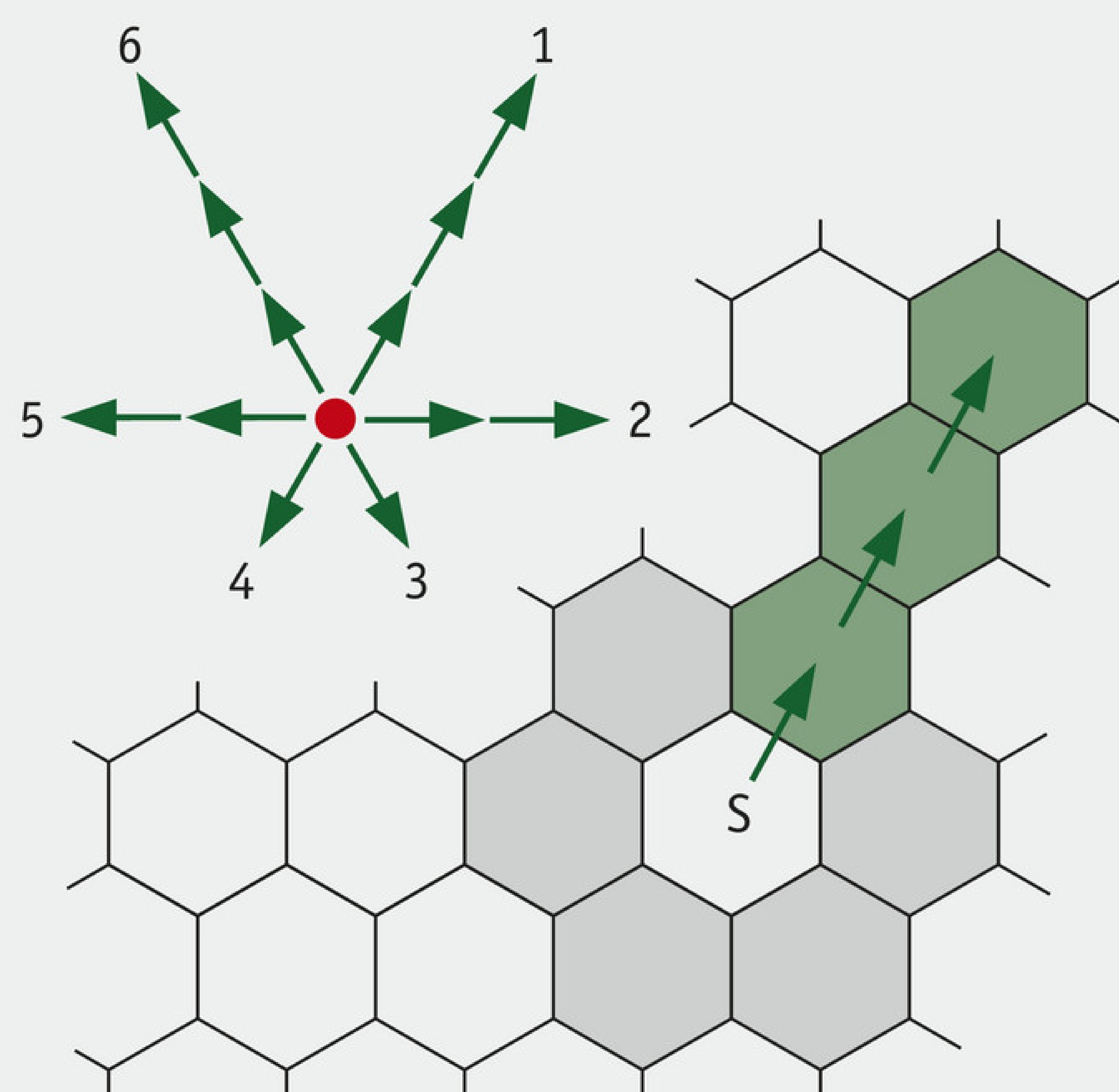
***Ronde 2** Unbiased random walk*
Laat de pion hierna tien keer een *unbiased random walk* maken. Zelfde spelregels, behalve:

2. Gooi met de dobbelsteen en verzet de pion als volgt:
   bij een 1: twee vakjes naar rechtsboven;
   bij een 2: twee vakjes naar rechts;
   bij een 3: twee vakjes naar rechtsonder;
   bij een 4: twee vakjes naar linksonder;
   bij een 5: twee vakjes naar links;
   bij een 6: twee vakjes naar linksboven.

Markeer de slotpositie van de pion met rood.

Verwerking

1. Welke *bias* heeft de *random walk* van een E. coli-bacterie?
2. Welke *bias* heeft de *random walk* van de pion in ronde 1?
3. Neem het startpunt als oorsprong (0,0). Bereken de gemiddelde x-coördinaat (horizontaal) en y-coördinaat (verticaal):
   - van de slotpositie van de pionnen in ronde 1;
   - van de slotpositie van de pionnen in ronde 2.
4. Verwacht je dat de gemiddelde x-slotposities van beide ronden duidelijk verschillend zijn? Zo ja, welk verschil verwacht je dan?
5. Verwacht je dat de gemiddelde y-slotposities van beide ronden duidelijk verschillend zijn? Zo ja, welk verschil verwacht je dan?
6. Hoe goed kloppen jouw verwachtingen met de uitkomsten van de simulatie?
7. Denk je dat die verwachtingen beter gaan kloppen als je meer simulaties doet: bijvoorbeeld 100 per ronde in plaats van 10 per ronde? Licht je antwoord toe.



▲ **figuur 29** Zo verzet je de pion als je een 1 gooit bij de *biased random walk*.

ONDERZOEK Getal van Froude

Uit onderzoek blijkt dat mensen en dieren spontaan overgaan van lopen op rennen als hun getal van Froude *Fr* stijgt tot boven 0,5. De snelheid bij *Fr* = 0,5 kan echter erg verschillend zijn.

a Bereken hoe groot die snelheid ongeveer is:
- voor een volwassen mens;
- voor een kind van circa zes jaar;
- voor een middelgrote hond;
- voor een rijpaard.

Gebruik foto's om aan de benodigde afmetingen te komen.

b Onderzoek bij welke snelheid je broertje/zusje/hond/pony/paard enzovoort spontaan overgaat van lopen op rennen. Leg dit vast op video.

c Bepaal zo zorgvuldig mogelijk bij welk getal van Froude overgeschakeld wordt van lopen op rennen. Is dat inderdaad ongeveer 0,5?



HOOFDSTUK 6

Geofysica: de natuurkunde van de aarde

Geofysica is de wetenschap die de aarde bestudeert met natuurkundige methoden. Op die manier kun je veel te weten komen over allerlei natuurlijke verschijnselen van en op planeet aarde. In dit hoofdstuk maak je kennis met verschillende geofysische meetmethoden en de vele onderwerpen die daarmee onderzocht kunnen worden. Met deze kennis kun je geld verdienen. Veel geofysici werken voor oliemaatschappijen en bedrijven die delfstoffen winnen. Zij doen gericht onderzoek om zo gemakkelijk mogelijk bij deze voorraden te komen. Ook kunnen geofysici zorgen voor meer veiligheid, bijvoorbeeld door het voorspellen van vulkaanuitbarstingen en de mate waarin de zeespiegel stijgt.

Introductie

Praktijk

Theorie

Maatschappij

Wat weet je al over geofysica?

Leerdoelen
1 Je kunt de zwaartekracht op een massa berekenen.
2 Je kunt de tweede wet van Newton toepassen.
3 Je kunt op basis van meetgegevens de veerconstante van een veer bepalen.
4 Je kunt berekeningen uitvoeren met de specificaties van een draad en de weerstand.
5 Je kunt beredeneren hoe spanning en stroom zich verdelen in serie- en parallelschakelingen.
6 Je kunt de dichtheid van een voorwerp bepalen.
7 Je kunt met behulp van een formule de SI-(basis)eenheid van een grootheid afleiden.

In de vorige leerjaren heb je al een aantal dingen geleerd over onderwerpen die ook horen bij de geofysica. Je hebt deze kennis weer nodig wanneer je aan dit hoofdstuk begint. Wil je snel controleren wat je nog weet? Maak dan de volgende opdrachten.

Opdrachten voorkennis

1 Een tennisballenkanon schiet een tennisbal weg met een massa van 60 g.
Bereken de grootte van de zwaartekracht op de tennisbal.

De zwaartekracht op de tennisbal is ________ N.

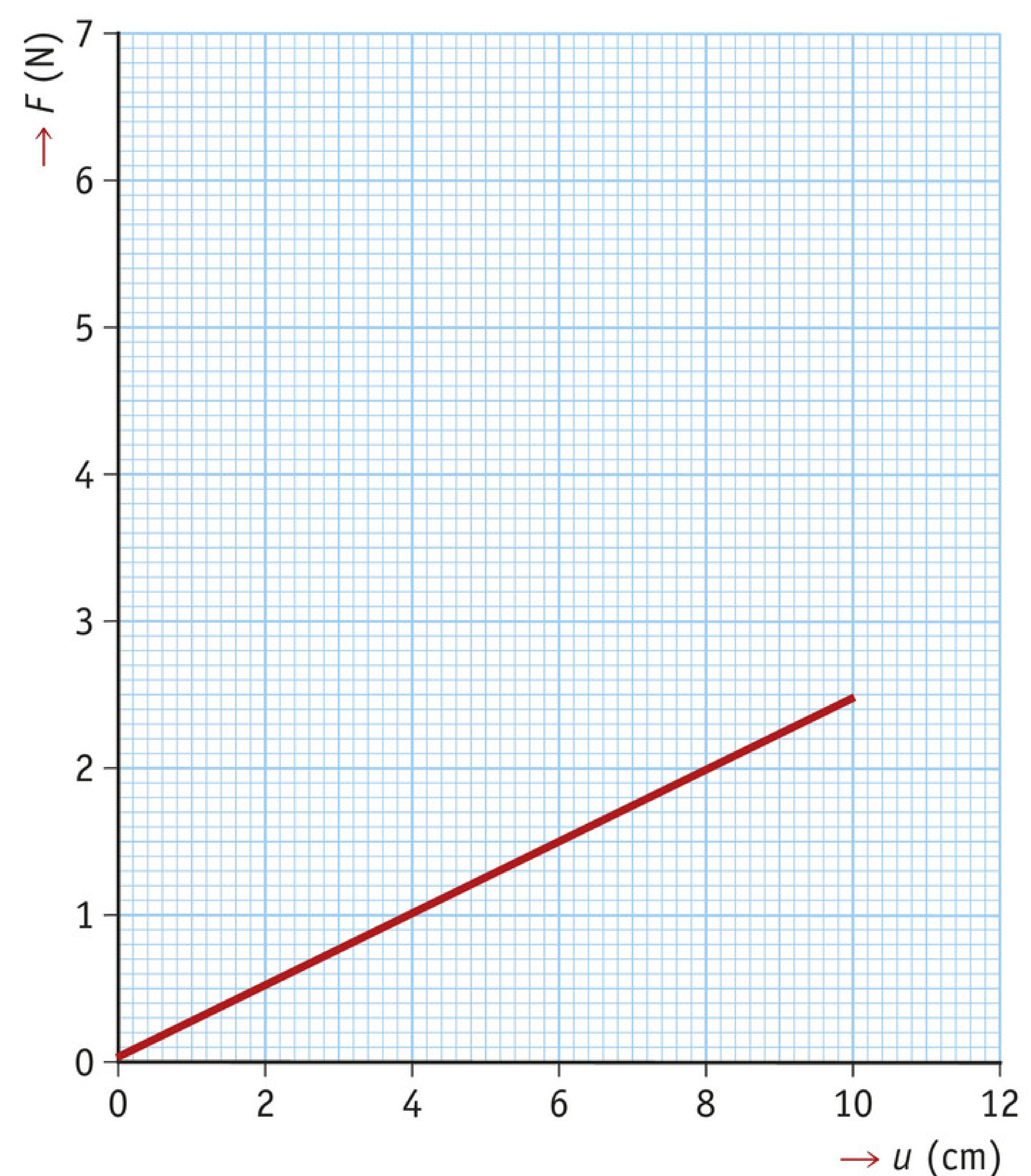
2 Een klimtouw moet de val van een klimmer opvangen. Bij een val mag de versnelling (vertraging) van een klimmer van 80 kg maximaal 140 m s^{-2} bedragen, omdat anders de kracht op de klimmer te groot wordt.
Bereken hoe groot de kracht (in kN) van een klimtouw uitgeoefend op de klimmer maximaal mag zijn om aan de norm te voldoen.

Die kracht mag dan maximaal ________ kN zijn.

3 Je ziet in afbeelding 1 de grafiek van een veer, waarbij de kracht is uitgezet tegen de uitrekking.
Bereken de veerconstante van de veer.

De veerconstante van de veer is

________ N cm^{-1}.



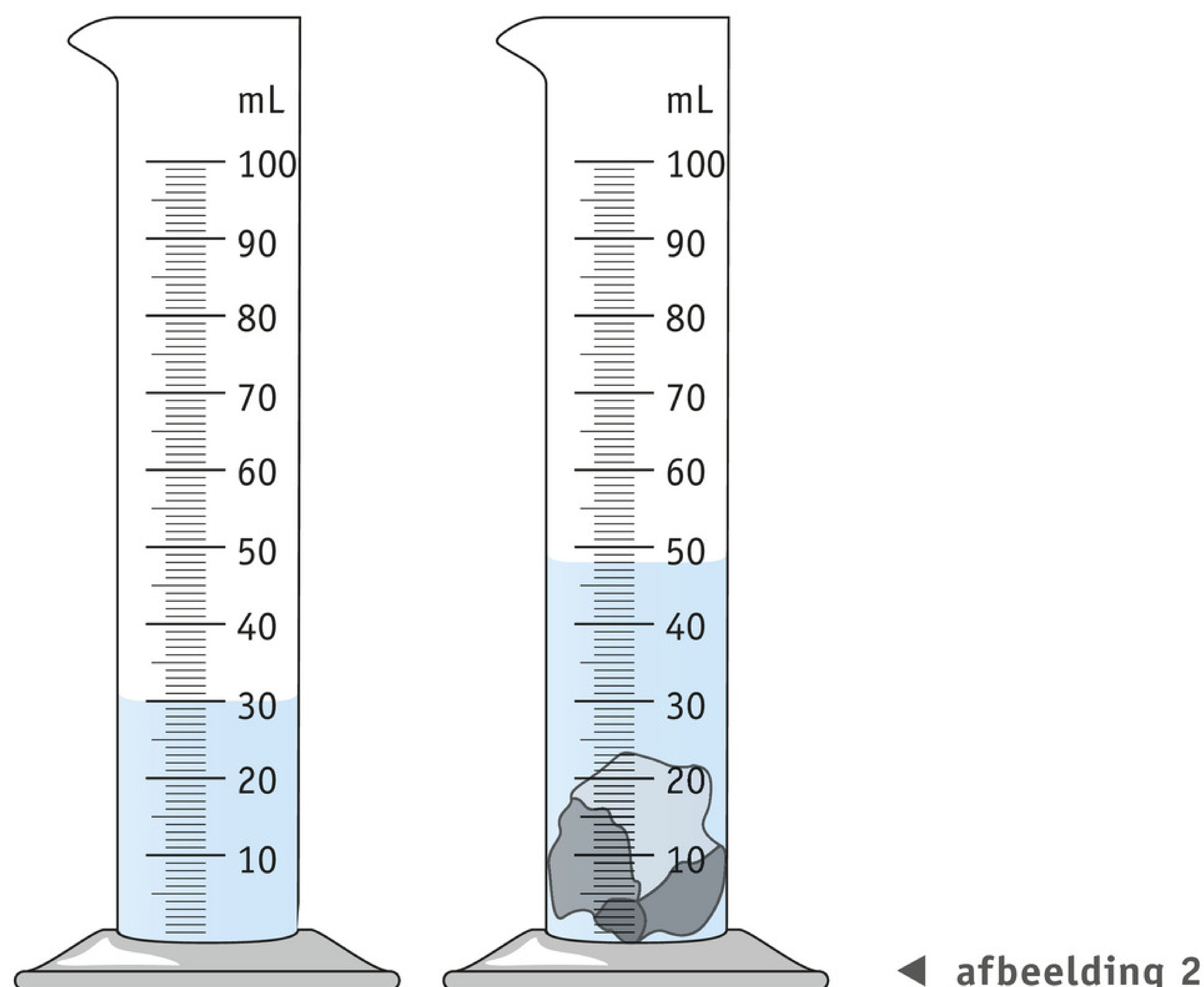
▲ afbeelding 1

4 Een ronde draad van een onbekend materiaal heeft een lengte van 1,5 m en een diameter van 1,2 mm. Als de draad op een spanningsbron van 2,5 V wordt aangesloten, loopt er een stroom van 4,2 A door de draad.
Bereken de soortelijke weerstand van het materiaal van de draad.

Die soortelijke weerstand is ________ Ω m.

5 Als je een lampje hebt dat goed brandt op een batterij, kun je op twee manieren een extra, identiek lampje aansluiten: in serie met het eerste lampje, of parallel eraan.
Kies de juiste opties.
Als je het tweede lampje in serie aansluit, zal het eerste *feller* / *even fel* / *zwakker* branden, vergeleken met de oorspronkelijke situatie. Het andere lampje brandt ook, het totale vermogen is *kleiner dan* / *gelijk aan* / *groter dan* het oorspronkelijke vermogen. De spanning over één lampje is namelijk *half zo groot* / *gelijk* waardoor de stroom door een lampje ook *half zo groot* / *gelijk* is. Het vermogen per lampje is dan $\sqrt{2}$ / *2* / *4* keer zo klein. Omdat er twee lampjes zijn, is het totale vermogen *twee keer zo klein* / *gelijk* / *twee keer zo groot* vergeleken met de oorspronkelijke situatie met slechts één lampje.

6 Margot laat een steen in een maatcilinder met water glijden. Zie afbeelding 2.
Ze heeft de steen gewogen: de massa is 45 g.



◀ **afbeelding 2**

Bepaal de dichtheid van deze steensoort.

De dichtheid van deze steensoort is ________ kg m^{-3}.

7 Om een holle cilinder met massa *m* en straal *r* met frequentie *f* te laten roteren om zijn as, is energie nodig. Bepaal door naar de eenheden te kijken welke formule voor de rotatie-energie de juiste is. De frequentie *f* is gelijk aan het aantal rotaties per seconde.

☐ $E_{rotatie} = 2\pi^2 \cdot m \cdot r^2 \cdot f^2$
☐ $E_{rotatie} = 2\pi^2 \cdot m^2 \cdot r^2 \cdot f^2$
☐ $E_{rotatie} = 2\pi^2 \cdot m \cdot r \cdot f^2$
☐ $E_{rotatie} = 2\pi^2 \cdot m \cdot r^2 \cdot f$

Wil je weten of je voldoende voorkennis hebt voor dit hoofdstuk, maak dan online de *Voorkennistoets*.

Praktijk

Onderzoek aan een gletsjer

De West-Antarctische ijskap is onder onze ogen aan het instorten en smelten. Op een mensenleven voltrekt dit proces zich langzaam: modelberekeningen komen uit op 200 tot 500 jaar. Maar op geologische tijdschalen is dit een oogwenk. Belangrijker nog: wetenschappers denken dat het proces dat nu in gang is gezet onomkeerbaar is. Dit kan zorgen voor een zeespiegelstijging van meer dan drie meter. Geofysisch onderzoek moet uitwijzen welke factoren een rol spelen bij de versnelde stroming en het smelten van de gletsjers.

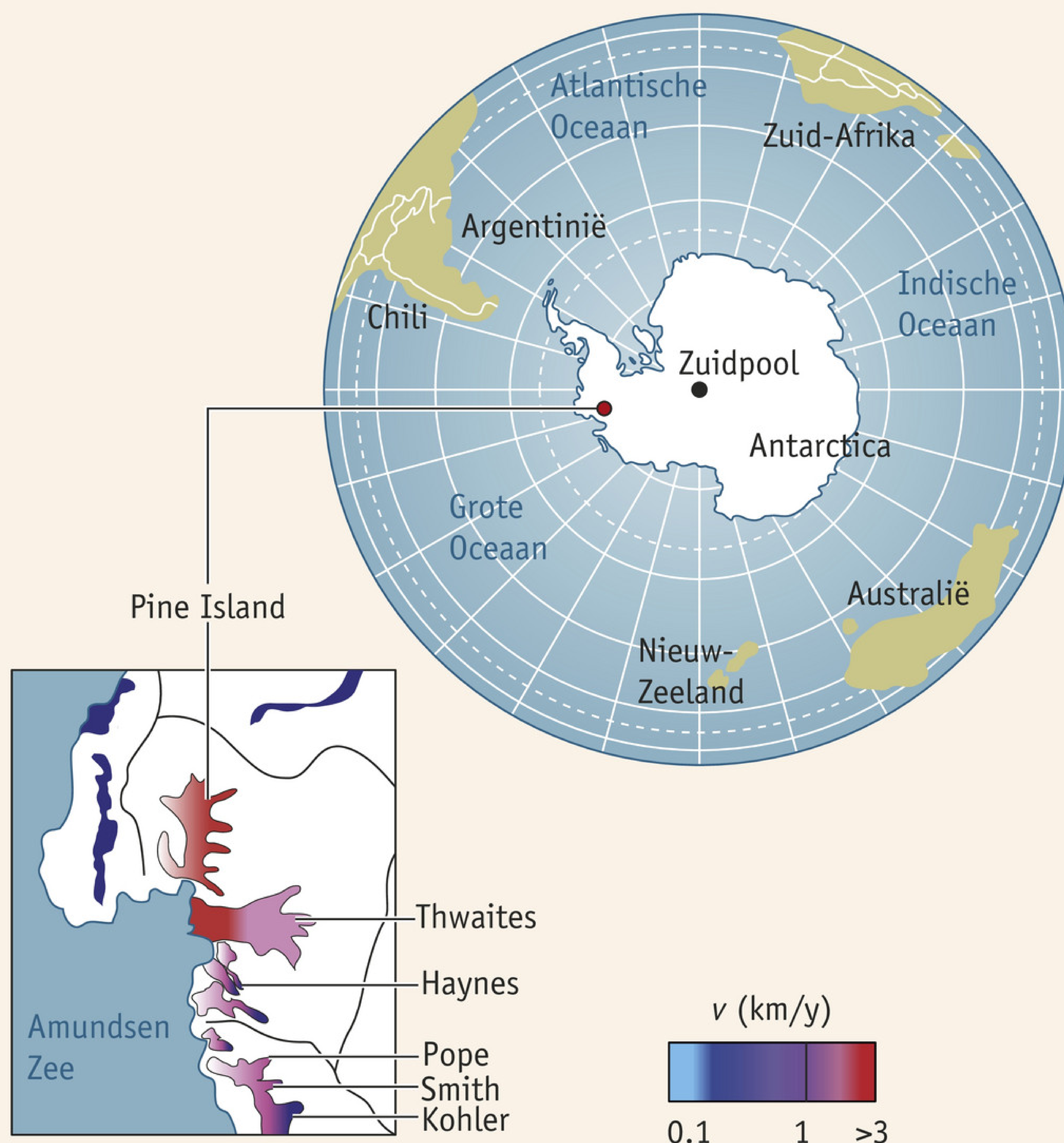


Pine Island-gletsjer

De Pine Island-gletsjer is een van de grootste van de honderden gletsjers van de West-Antarctische ijskap. Het ijs van alleen deze gletsjer, zo'n 400 000 km^3, kan al voor een zeespiegelstijging van ongeveer 70 cm zorgen. De gletsjer wordt al sinds de jaren 1960 onderzocht. Uit radarmetingen vanuit satellieten blijkt dat hij tussen 1973 en 2013 75% sneller is gaan stromen, waardoor er steeds meer ijs in zee belandt. Ook andere gletsjers in die buurt zijn de laatste jaren steeds sneller gaan stromen (figuur 1).

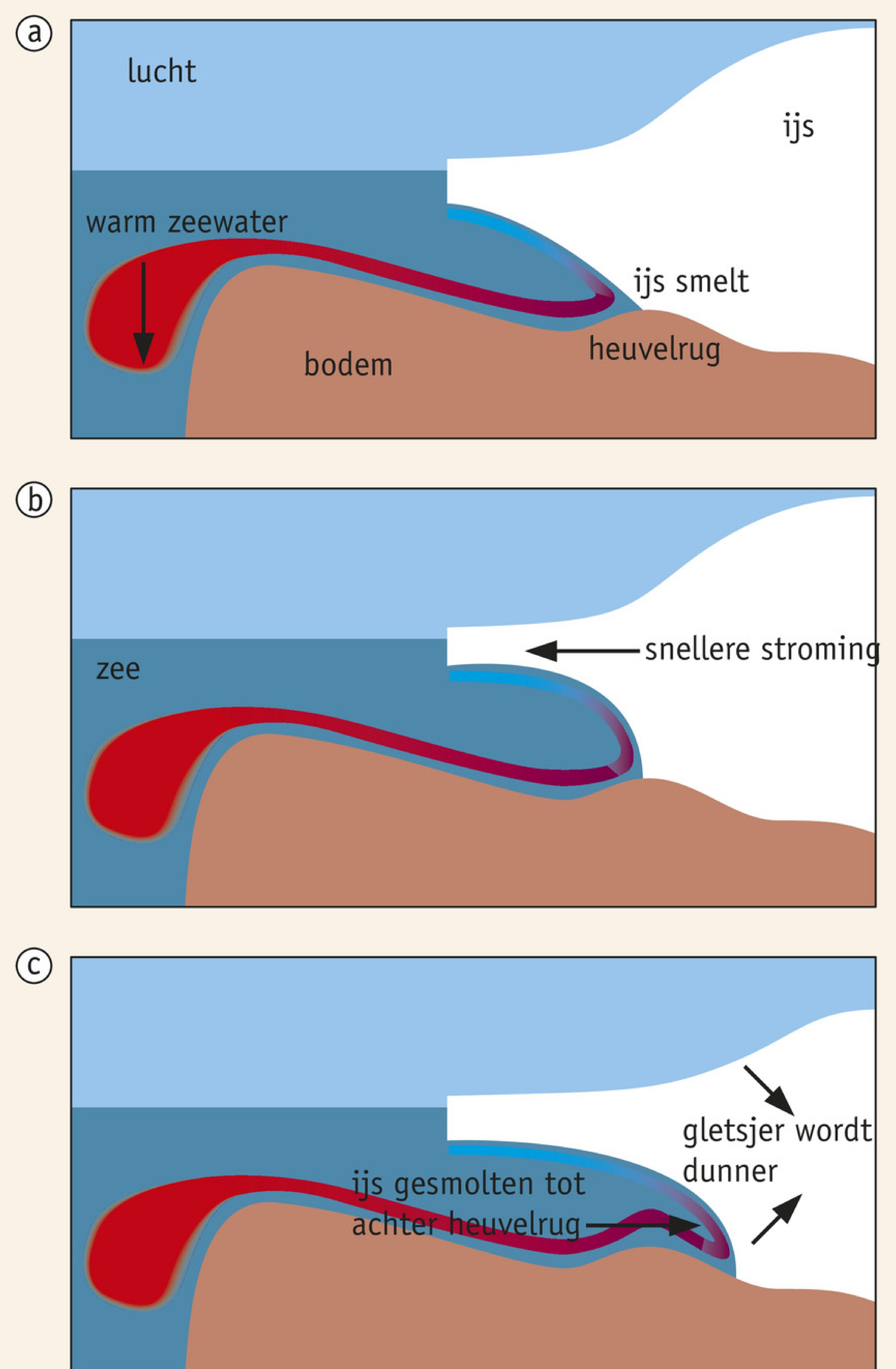
Rivieren van ijs

Gletsjers worden gevormd door dikke lagen sneeuw die door hun eigen gewicht worden samengeperst tot ijs. Hoewel ijs vast is, kunnen gletsjers toch stromen. Ten eerste door als geheel over de ondergrond te glijden, ten tweede doordat het ijs door het gewicht vervormt en aan de randen smelt. In berggebieden stromen gletsjers naar een dal, waarna het water wegstroomt via allerlei beekjes en rivieren. In poolgebieden stromen ze de zee in. Gletsjers zijn dus een soort rivieren van ijs. Wanneer de hoeveelheid gletsjerijs die in zee terechtkomt even groot is als de hoeveelheid sneeuw die op het land valt, is de gletsjer in evenwicht: hij blijft in omvang gelijk. Door verschillende oorzaken kan dat evenwicht verstoord raken, waardoor de gletsjer in omvang toe- of afneemt.
Het grootste deel van de Pine Island-gletsjer bestaat uit landijs van ruim 2 km dik. Het uiteinde van de gletsjer drijft in de Amundsen Zee. Het punt waar de gletsjer loskomt van de ondergrond wordt de *grounding line* genoemd. De eigenschappen van de ondergrond en de positie van de *grounding line* spelen een belang-



▲ **figuur 1** stroomsnelheden van verschillende gletsjers die in de Amundsen Zee uitkomen: hoe roder, hoe hoger de stroomsnelheid

In november 2013 is een grote ijsplaat losgebroken.

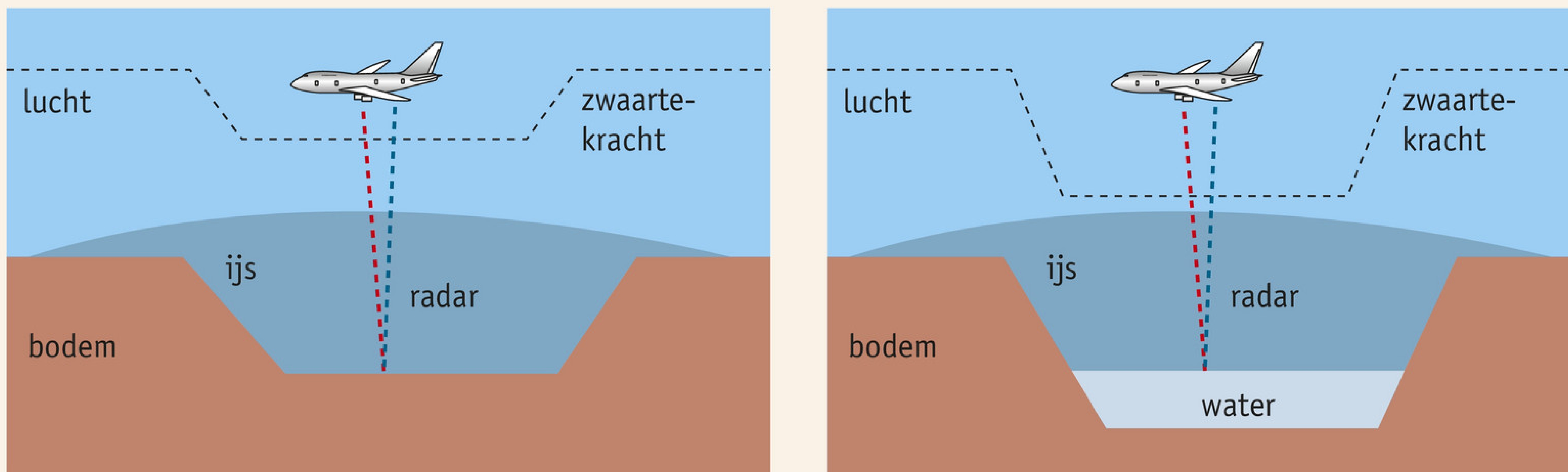


▶ **figuur 2** De gletsjer wordt eerst tegengehouden door de heuvelrug (a), maar als het ijs aan de onderkant wegsmelt (b), wordt een punt bereikt waarbij de gletsjer over de heuvelrug heen drijft (c).

rijke rol in de versnelling die wetenschappers de laatste jaren hebben waargenomen. Warm oceaanwater onder de gletsjer dringt door tot de *grounding line*, die zich daardoor verder landinwaarts terugtrekt (figuur 2). Onderzoekers willen zo precies mogelijk weten wat de vorm is van de ondergrond, om met computermodellen te kunnen voorspellen wat de gletsjer gaat doen.

Onderzoek onder zware omstandigheden

Er worden verschillende methoden gebruikt om de ondergrond en de andere eigenschappen van de Pine Island-gletsjer in kaart te brengen. Probleem is dat de gletsjer niet gemakkelijk te bereiken is: hij ligt meer dan duizend kilometer van de grote onderzoeksstations op Antarctica, gelijk aan de afstand Amsterdam-Bordeaux, maar dan zonder snelwegen. Afhankelijk van de locatie van het onderzoeksstation varen onderzoekers met schepen vanaf Zuid-Amerika, Zuid-Afrika, of Australië. Het laatste stuk van de reis gaat per helikopter. De reistijd bedraagt al snel een maand. Er gaan tegenwoordig ook wel vliegtuigen die op het ijs kunnen landen. Deze vluchten zijn niet echt comfortabel, maar wel een stuk sneller. Meteorologisch onderzoek kan ook worden uitgevoerd door onbemande stations die hun data via satellieten naar onderzoekscentra sturen. De stations werken op accu's die in de



▲ **figuur 3** Zwaartekrachtmetingen vullen radarmetingen aan: hoe dieper de waterlaag onder het ijs, hoe kleiner de zwaartekracht.

Antarctische zomer worden opgeladen. Soms kan geofysisch onderzoek vanuit de lucht worden uitgevoerd met vliegtuigen of satellieten. Maar voor het precies in kaart brengen van de ondergrond blijft het nodig ter plaatse metingen te verrichten. Zo boren onderzoekers met een holle boor ijskernen om te bepalen of er water zit tussen de gletsjer en de ondergrond. De aan- of afwezigheid van water heeft grote invloed op de stroomsnelheid van de gletsjer.
De ondergrond en de structuur van het ijs kunnen verder in kaart worden gebracht met geluidstrillingen die door explosies worden opgewekt. De trillingen worden door scheuren in het ijs of door de ondergrond gereflecteerd en door geofoons opgevangen. Met behulp van het signaal van meerdere geofoons kan een computer een beeld van het ijs en de ondergrond maken.

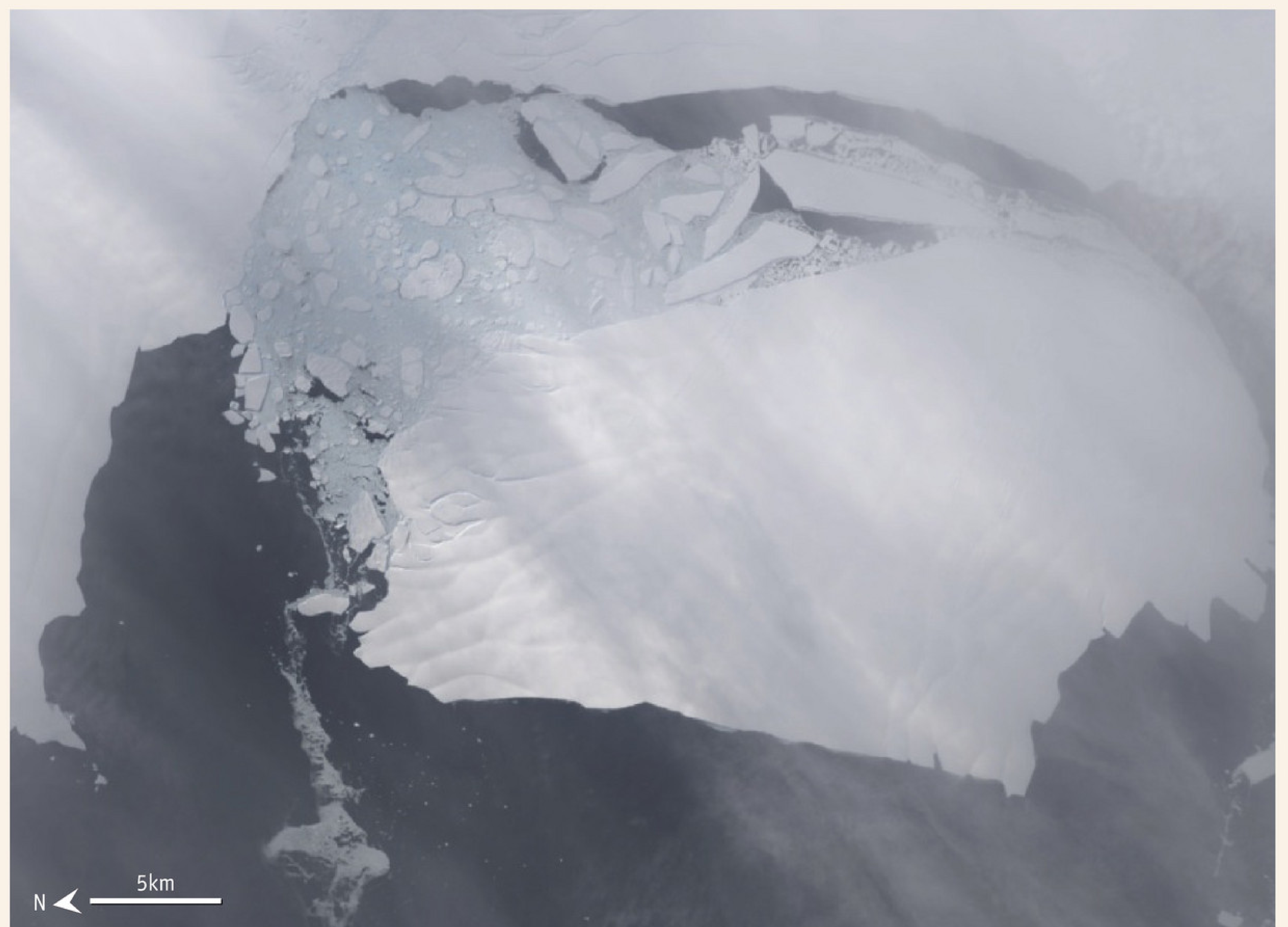
Metingen vanuit de lucht

Met satellieten zijn de beweging en de verandering van de afmetingen van gletsjers over de jaren het gemakkelijkst in beeld te brengen. Satellieten draaien in een baan om de aarde en komen herhaaldelijk boven hetzelfde stukje aarde. Wat er aan de onderkant van de gletsjer gebeurt, is met satellieten echter niet te zien. Daarvoor wordt gebruikgemaakt van vliegtuigen die met behulp van radarapparatuur de dikte van het ijs meten.
Radar werkt met radiogolven die gedeeltelijk teruggekaatst worden door het oppervlak van ijs, maar gedeeltelijk ook door het ijs gaan en teruggekaatst worden aan de onderkant van een gletsjer. Uit de radarmetingen is af te lezen of het ijs op land rust of dat er water onder de gletsjer zit. De diepte van de waterlaag kan niet bepaald worden, omdat radiogolven niet door water heen gaan: een ondiepe of diepe waterlaag weerkaatst de radiogolven op dezelfde manier.

Daarom worden de radarmetingen aangevuld met zwaartekrachtmetingen (figuur 3). Zwaartekrachtmetingen zijn zo gevoelig dat ze het verschil in de valversnelling kunnen meten tussen een ondergrond van gesteente of een ondergrond van water.

Onomkeerbaar?

Uit de radarmetingen is gebleken dat ter hoogte van de *grounding line* van de Pine Island-gletsjer zich een heuvelrug bevindt, die de gletsjer nu nog tegenhoudt. Daardoor ontstaat een



▲ **figuur 4** Een deel van de Pine Island-gletsjer breekt af (satellietopname uit november 2013).

De Larsen-C ijsplaat

Aan de rand van West-Antarctica bevindt zich de enorme Larsen-C ijsplaat. Al in 2010 werd in deze ijsplaat een scheur waargenomen. Begin juni 2017 meldden verschillende media dat de scheur zeer snel groter was geworden. In slechts zes dagen was de scheur 17 km gegroeid tot een lengte van bijna 200 km. Op 12 juli was het zover: een enorme ijsberg, zo'n 10% van de ijsplaat, scheurde los. De ijsberg zou meer dan 1 biljoen ton wegen en is in oppervlakte groter dan de provincie Gelderland. De situatie is vergelijkbaar met die bij de Pine Island-gletsjer: ook deze ijsplaat houdt een gletsjer tegen. Als de ijsplaat kleiner wordt, kan de achterliggende gletsjer versnellen en komt er een grote hoeveelheid extra water de oceaan in. Dit zal een zeespiegelstijging tot gevolg hebben.

instabiele situatie: als de *grounding line* eenmaal voorbij die heuvelrug is getrokken, gaat de gletsjer steeds sneller stromen. Een steeds groter deel van de gletsjer gaat drijven, waardoor meer warm zeewater steeds dieper onder de gletsjer kan komen. Dit kan verklaren waarom de gletsjer de afgelopen jaren sneller is gaan bewegen.
Het uiteinde van de gletsjer dat op de zee drijft kan door zijn traagheid het deel van de gletsjer dat op het land ligt nog enigszins tegenhouden. Bijkomend probleem is dat het uiteinde van de gletsjer door het warmer wordende zeewater scheuren gaat vertonen en afbrokkelt. Zo is er in november 2013 een grote ijsplaat losgebroken (figuur 4). Dit zal een versnellend effect hebben op de beweging van de rest van de gletsjer.

De weinig opbeurende boodschap is dat we getuige zijn van een mogelijk onomkeerbaar proces. Wat voor de Pine Island-gletsjer geldt, geldt voor de hele West-Antarctische ijskap: deze is versneld aan het smelten. In welk tempo dat gaat is nog verre van zeker. Daarvoor is meer onderzoek nodig in dit gebied, zodat modelberekeningen nauwkeuriger kunnen worden.

Opdrachten

Bestudeer eerst de theorie van dit hoofdstuk voordat je de volgende opdrachten uitvoert.

1 Zeespiegelstijging
Op dit moment komt er ongeveer 80 km^3 meer ijs per jaar van de Pine Island-gletsjer in zee dan er door sneeuw op het land bij komt.

- **a** Bereken hoeveel de zeespiegel daardoor per jaar stijgt. Gebruik hierbij dat 70% van het aardoppervlak bedekt is met water. Neem aan dat de dichtheid van ijs gelijk is aan die van water.

In de tekst staat dat de zeespiegel met 70 cm zal stijgen als alle $4{,}0 \cdot 10^5$ km^3 ijs smelt die via de gletsjer met de zee verbonden is.

- **b** Controleer door middel van een berekening deze uitspraak.
- **c** Leg uit waarom je een ander antwoord krijgt dan in de tekst is genoemd. Hint: denk na over het verschil tussen het uiteinde van de gletsjer en de plek waar het ijs vandaan komt.

2 Zwaartekrachtmetingen
Vanuit een vliegtuig worden zwaartekrachtmetingen gedaan. In principe wil je dan de valversnelling meten, maar een gravimeter kan geen verschil zien tussen de valversnelling en de versnelling van het vliegtuig. De gravimeter meet dus een combinatie van beide versnellingen.

- **a** Leg uit of dit effect alleen geldt voor verticale versnellingen of dat het ook geldt voor horizontale versnellingen.
- **b** Leg uit hoe hiervoor gecorrigeerd kan worden (je hoeft geen exacte formules te geven).
- **c** Welke correctie is nog belangrijker bij zwaartekrachtmetingen uit een vliegtuig?

3 Seismiek
De snelheid van seismische trillingen in ijs is gemiddeld $3{,}8 \cdot 10^3$ $m\,s^{-1}$. Bovenop een ijslaag met een dikte van 2,9 km worden explosieven tot ontploffing gebracht.

- **a** Bereken na hoeveel tijd de reflectie van de explosie door een geofoon vlak bij de bron wordt gemeten.

Een andere geofoon staat op 1,2 km afstand van de bron.

- **b** Bereken na hoeveel tijd de reflectie van de explosie door deze geofoon wordt gemeten.
- **c** Leg uit hoe met deze methode een beeld kan worden gevormd van de ondergrond.

1 Het inwendige van de aarde

In deze paragraaf leer je:
- hoe een geofysicus onderzoek doet naar de samenstelling van de aarde;
- uit welke lagen de aarde is opgebouwd, op basis van samenstelling en op basis van mechanische eigenschappen;
- wat de toepassingen zijn van geofysisch onderzoek.

Het diepste boorgat in de aarde is gemaakt in Rusland op het schiereiland Kola: ruim twaalf kilometer diep. Vergeleken met de straal van de aarde (ongeveer 6000 km) stelt dat niet veel voor. Alleen gesteenten uit de buitenste dunne laag van de aarde kunnen dus rechtstreeks onderzocht worden. Onderzoekers moeten daarom op een *indirecte* manier het inwendige van de aarde onderzoeken.

Geofysische methoden

Alleen door middel van boringen kan een geofysicus direct te weten komen welke gesteenten en mineralen zich op een bepaalde diepte bevinden (figuur 1). Het nadeel is dat boringen relatief duur zijn en dat je slechts van één bepaalde plaats het profiel van de bodem te weten komt. Meerdere boringen zijn nodig om een compleet beeld te krijgen. Bovendien gaan boringen vaak niet diep genoeg.



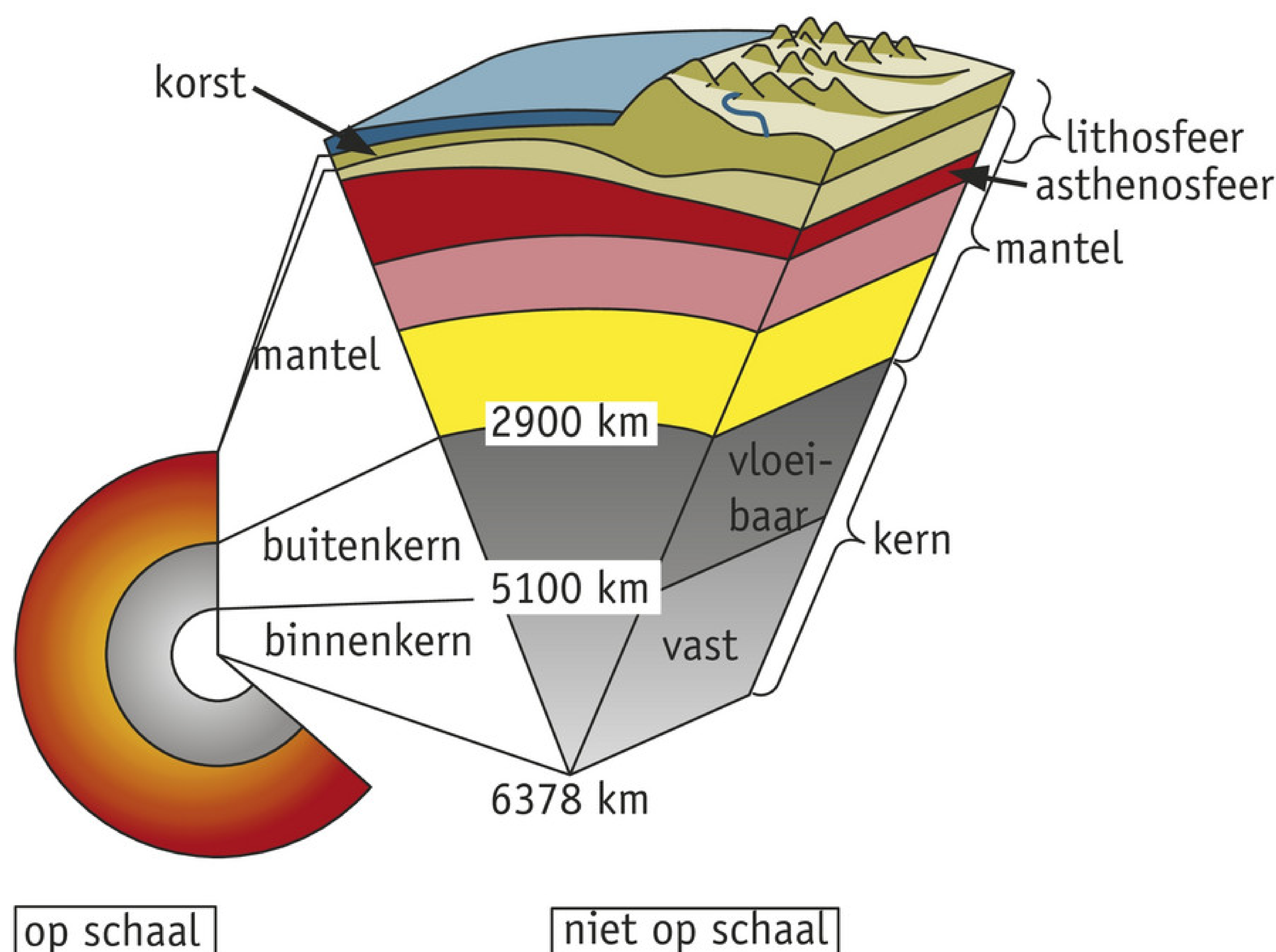
▲ **figuur 1** Een geoloog onderzoekt een deel van een boorkolom.

Daarom meet een geofysicus vaak eerst met verschillende methoden de eigenschappen van de gesteenten onder het aardoppervlak, zoals de snelheid waarmee trillingen zich voortbewegen, de dichtheid en magnetische en elektrische eigenschappen. Deze gegevens worden gebruikt in computermodellen, die een beeld geven van hoe de bodem is opgebouwd en of er zich op een bepaalde diepte interessante mineralen bevinden.

Lagen in de aarde

Een veelgebruikte geofysische methode is **seismologie**: de studie naar trillingen in de aarde die vrijkomen bij aardbevingen. Uit seismologisch onderzoek is gebleken dat de aarde uit verschillende lagen bestaat (figuur 2). De snelheid van seismische trillingen verandert abrupt tussen de ene en de andere laag. Vanaf het aardoppervlak zijn er de volgende lagen:

- **Aardkorst**. De buitenste laag van de aarde is vast en bestaat voornamelijk uit graniet en basalt. De aardkorst is dun: ongeveer 8 km onder oceanen en 32 km onder continenten. De aardkorst bestaat uit verschillende delen: de continentale platen. Die platen drijven als het ware op de volgende laag, de mantel.
- **Mantel**. De mantel is ongeveer 2900 km dik en grotendeels vervormbaar. Mantelgesteenten bestaan grotendeels uit silicaathoudende mineralen, zoals olivijn en pyroxeen.
- **Buitenkern**. De buitenkern is ongeveer 2200 km dik en bestaat voornamelijk uit vloeibaar ijzer en nikkel. Door de stromingen (convectie) in de buitenkern wordt een magneetveld opgewekt. De precieze werking is niet bekend, maar van belang is dat in nikkel en ijzer vrije elektronen voorkomen die door de stroming een magneetveld opwekken. Deze stroming kan in de loop van de tijd veranderen, waardoor het magneetveld kan variëren. Het blijkt dat in de geschiedenis van de aarde de richting van het magneetveld meerdere keren is omgekeerd.
- **Binnenkern**. Door de extreme druk op deze diepte is het binnenste deel van de aarde vast.

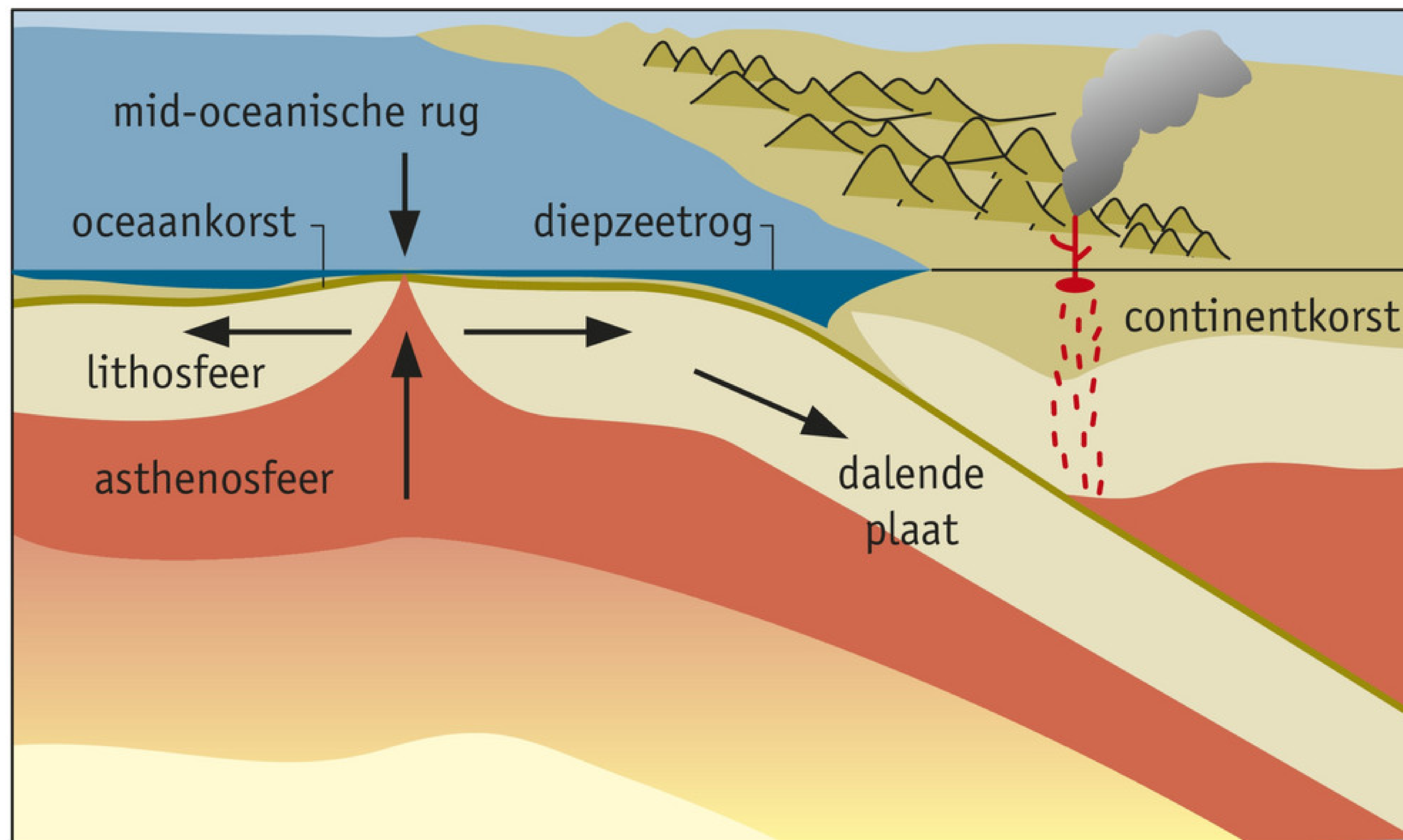


▲ **figuur 2** het inwendige van de aarde

Vaak gebruiken geofysici een andere indeling, op basis van mechanische eigenschappen, vanaf het aardoppervlak:

- **Lithosfeer**. Dit is de aardkorst en het bovenste deel van de mantel. De lithosfeer bestaat uit voornamelijk vast gesteente, dat onder druk niet vervormt, maar breekt. De dikte varieert tussen 100 km onder oceanen en 400 km onder continenten.
- **Asthenosfeer**. Dit deel van de mantel is door de hoge temperatuur gemakkelijk te vervormen. De lithosfeer drijft als het ware op de asthenosfeer. Deze laag is ongeveer 100 km dik.
- De **rest van de mantel**. De rest van de mantel is vast, maar kan nog wel iets vervormen.
- De laatste twee lagen zijn dezelfde als hierboven: de buitenkern en de binnenkern.

Er wordt nog steeds onderzoek gedaan naar deze opbouw, bijvoorbeeld naar de beweging van gesteenten in de mantel. Daar treedt **convectie** op, zoals in een een pan soep op het vuur. Warme gesteenten die zich diep in de mantel bevinden, stijgen op en koudere gesteenten dalen. Deze bewegingen en de uitwisseling van warmte vormen de motor achter de bewegingen van de platen in de lithosfeer, waardoor bijvoorbeeld de verschillende continenten ten opzichte van elkaar bewegen (figuur 3).



▲ **figuur 3** bewegingen van continentale platen

Toepassingen van geofysisch onderzoek

Geofysische metingen worden voor verschillende praktische toepassingen gebruikt. Bijvoorbeeld voor het opsporen van olie en gas, en andere delfstoffen. Oliemaatschappijen gebruiken vooral seismische methoden. Omdat deze methoden duur zijn, worden vaak eerst zwaartekrachtmetingen of magnetische metingen vanuit een vliegtuig gedaan. Zo kan relatief gemakkelijk een groot gebied onderzocht worden. Voor het opsporen van metaalertsen kunnen, naast seismische methoden, elektrische, magnetische en zwaartekrachtmetingen gebruikt worden.
Op kleinere schaal worden geofysische methoden bijvoorbeeld ingezet bij bouwprojecten, om de stabiliteit van de ondergrond te bepalen. Ook archeologisch onderzoek maakt tegenwoordig gebruik van deze methoden. Zo kunnen overblijfselen van oude culturen in de bodem ontdekt worden zonder dat daarvoor een opgraving nodig is.
Veel geofysisch onderzoek wordt gedaan naar de kans op **aardbevingen**. Door de bewegingen in de platen in de lithosfeer ontstaan er op sommige plekken in de aardkorst mechanische spanningen. Bij het ‘ontspannen’ ontstaat een aardbeving. Deze bewegingen worden nauwkeurig bijgehouden om te bepalen in welke gebieden er een grotere kans op aardbevingen is. Helaas is het nog lang niet mogelijk om het tijdstip en de kracht van aardbevingen te voorspellen.
Vulkanisme is beter voorspelbaar. Als gesmolten gesteente omhoogkomt, zal het een weg naar de oppervlakte zoeken. De lithosfeer is vast, waardoor het gesmolten gesteente alleen omhoog kan komen door barsten in het omringende gesteente te veroorzaken. Als het gesteente barst, ontstaan er trillingen die meetbaar zijn. Deze geven een indicatie van de hoeveelheid gesmolten gesteente die opstijgt. Zo komen geologen erachter bij welke vulkanen er een verhoogd risico is op een uitbarsting. Ze gebruiken daarvoor ook andere gegevens, zoals een plaatselijke opzwelling van het aardoppervlak of de samenstelling van gassen die vrijkomen in een vulkanisch gebied.

Onthoud!

- Onderzoek naar het inwendige van de aarde wordt grotendeels gedaan met indirecte meetmethoden op basis van natuurkundige eigenschappen van gesteenten, zoals de snelheid waarmee trillingen zich voortbewegen, de dichtheid en magnetische en elektrische eigenschappen.
- Geofysische metingen worden onder andere gebruikt bij de opsporing van delfstoffen, bij bouwprojecten, bij archeologisch onderzoek en bij onderzoek naar vulkanisme en aardbevingen.
- Op grond van de samenstelling wordt de aarde opgedeeld in een (aard)korst, mantel, buiten- en binnenkern.
- Op grond van mechanische eigenschappen onderscheiden geofysici de lithosfeer (vast) en asthenosfeer (vervormbaar).

Opdrachten

1 Seismologie
Seismologie houdt zich bezig met onderzoek naar het inwendige van de aarde met behulp van trillingen.
Noem de natuurlijke trillingsbron die wordt gebruikt voor het onderzoek naar de diepste structuren in de aarde.

2 Lithosfeer en asthenosfeer
Het onderste deel van de lithosfeer en de asthenosfeer horen beide bij de mantel.
a Noem het belangrijkste verschil tussen de lithosfeer en de asthenosfeer.
b Noem de belangrijkste overeenkomst tussen het onderste deel van de lithosfeer en de asthenosfeer.

3 Lagen in de aarde
De aarde bestaat uit verschillende lagen.
a Noem de laag waarin het aardmagneetveld wordt opgewekt.
b Leg uit welke twee eigenschappen van deze laag het mogelijk maken om een magneetveld op te wekken.

Je maakt een model van de aarde ter grootte van een voetbal waarin je de vier aardlagen (aardkorst, mantel, buiten- en binnenkern) op schaal weergeeft.
c Bereken de dikte die elke laag moet hebben. Een voetbal heeft een diameter van 22 cm.

4 Geofysische methoden
In de paragraaf worden vijf verschillende geofysische methoden genoemd.
Leg voor de volgende drie situaties uit welke geofysische methode het meest geschikt is:
I onderzoek naar de aanwezigheid van giftige stoffen in de bodem
II onderzoek naar breuklijnen en scheuren in een rotsformatie
III lokaliseren van oude metalen leidingen in de bodem

5 Mid-oceanische rug
In figuur 3 is te zien hoe bij een mid-oceanische rug de oceanische platen uit elkaar drijven waardoor mantelgesteente uit de asthenosfeer naar de oppervlakte kan komen.
a Geef een mogelijke oorzaak voor het opwellen van mantelgesteente.

In figuur 3 duikt de oceanische plaat onder de continentale plaat.
b Wat kun je hieruit afleiden over de dichtheid van beide platen?

+6 Kern van de maan
De maan heeft een mantel die wat samenstelling betreft lijkt op de mantel van de aarde. De dichtheid van de mantel van de maan bedraagt $3{,}3 \cdot 10^{3}$ kg m^{-3}.
Gebruik gegevens uit Binas om te bepalen of de maan, net als de aarde, een ijzeren kern heeft. Ondersteun je antwoord door een berekening.

2 Zwaartekrachtmetingen

In deze paragraaf leer je:
- dat de valversnelling niet overal op aarde dezelfde waarde heeft;
- welke oorzaken er zijn voor de afwijkingen in de valversnelling;
- hoe met zwaartekrachtmetingen delfstoffen gevonden kunnen worden.

De zwaartekracht is niet overal op aarde even sterk, onder andere door de eigenschappen van verschillende gesteenten. Een snelle manier voor het in kaart brengen van plaatsen waar zich mogelijk delfstoffen bevinden is het uitvoeren van zwaartekrachtmetingen vanuit een vliegtuig.

De valversnelling

De gemiddelde valversnelling is in Nederland 9,81 m s^{-2} (Binas tabel 7A). In een vacuüm valt een veertje even snel als een blok lood: de valversnelling is dus onafhankelijk van de massa van het voorwerp dat je laat vallen. De valversnelling is een gevolg van de gravitatiekracht die massa's op elkaar uitoefenen. De valversnelling kun je berekenen met:

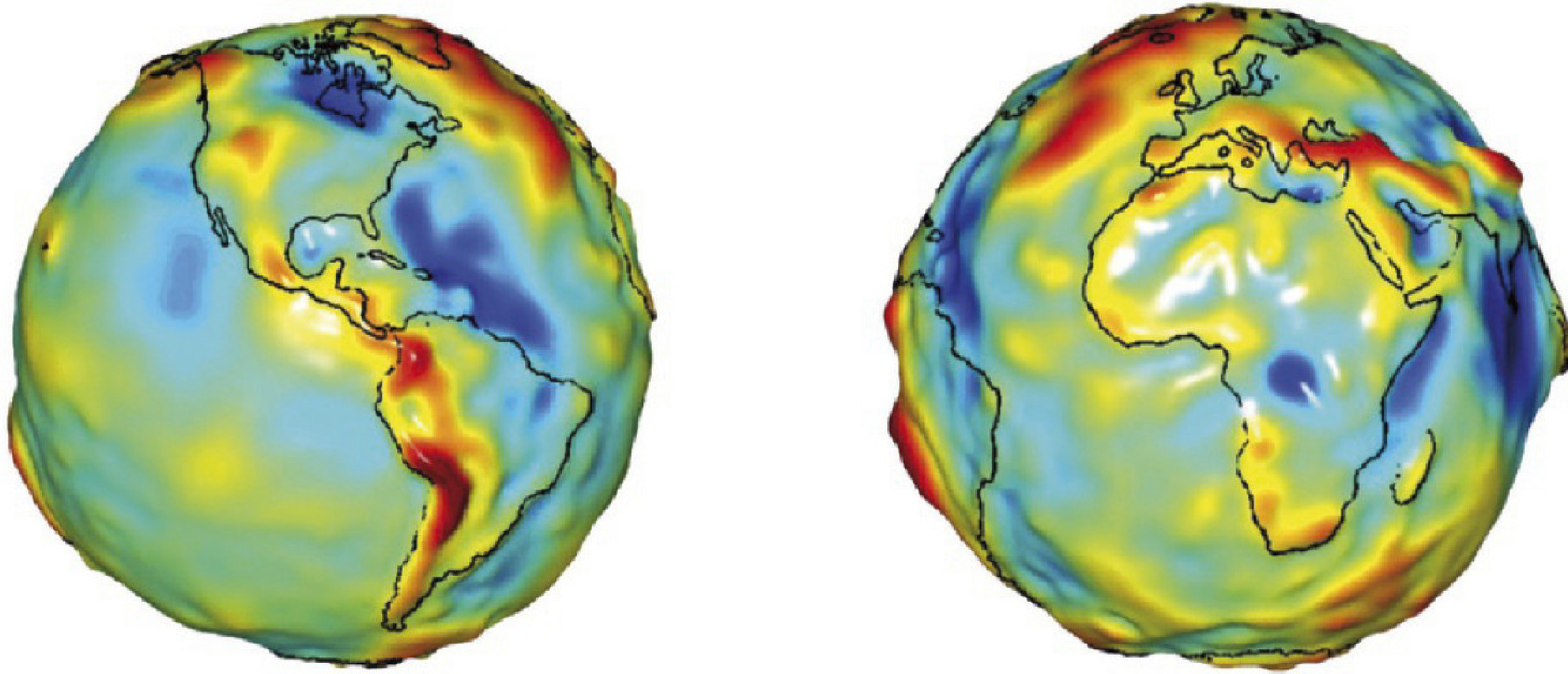
$$g = \frac{G \cdot M}{r^2}$$

Hierin is:
- g de valversnelling in meter per seconde kwadraat (m s^{-2});
- G de gravitatieconstante in newton keer meter kwadraat per kilogram kwadraat (N m^{2} kg^{-2});
- M de massa van het lichaam dat het voorwerp aantrekt (de aarde) in kilogram (kg);
- r de afstand van het vallende voorwerp tot het massamiddelpunt van het lichaam dat het voorwerp aantrekt in meter (m).

De aarde heeft een massa van $5{,}972 \cdot 10^{24}$ kg en de gemiddelde straal is $6{,}371 \cdot 10^{6}$ m (zie Binas tabel 31). G heeft een waarde van $6{,}674 \cdot 10^{-11}$ N m^{2} kg^{-2} (Binas tabel 7A). Als je deze waarden invult in de formule voor de valversnelling, dan vind je een waarde van 9,819 m s^{-2}. Deze waarde zou je meten wanneer de aarde een perfecte bol was, er geen invloed was van de gravitatiekracht van de zon en de maan en als de aarde niet zou draaien.

Variaties in de valversnelling

In werkelijkheid zijn er grote variaties in de valversnelling op aarde. Zo kun je op de evenaar een waarde meten van 9,78 m s^{-2} en op de polen 9,83 m s^{-2}. Dat komt doordat de aarde geen perfecte bol is: de straal is bij de evenaar groter dan bij de polen. Bovendien draait de aarde om haar as. Beide effecten, verschil in straal en draaiing, zorgen voor een lagere valversnelling aan de evenaar.
De valversnelling hangt ook nog af van getijdenwerking, veroorzaakt door de draaiing van de maan om de aarde en van de aarde-maan om de zon. En wanneer je bovenop een berg staat, dan zorgt de massa van de berg voor een extra aantrekking en zo een hogere valversnelling (figuur 4). Dat je hoger bent, en dus verder van het massamiddelpunt van de aarde, zorgt weer voor een lagere waarde, zoals volgt uit de formule voor de valversnelling.



▲ **figuur 4** Afwijkingen van de zwaartekracht. Rood geeft aan dat de zwaartekracht sterker is ten opzichte van de zwaartekracht van een geheel gladde aarde, blauw dat de zwaartekracht zwakker is.

Tot slot veroorzaken dichtheidsverschillen in de aarde afwijkingen in de valversnelling. Een geofysicus wil deze dichtheidsverschillen meten, om zo te onderzoeken uit welke gesteenten de ondergrond bestaat en of zich daar delfstoffen in bevinden. Deze gemeten dichtheidsverschillen zullen dus gecorrigeerd moeten worden voor alle andere afwijkingen.

Meten van de valversnelling

Om dichtheidsverschillen te meten maakt een geofysicus eerst met een **gravimeter** (zwaartekrachtmeter) een gedetailleerde kaart van de grootte van de valversnelling. De metingen worden vervolgens gecorrigeerd voor de breedtegraad en de hoogte waarop de metingen zijn uitgevoerd, en de massa van het gebergte.
Als je op een bepaalde hoogte boven zeeniveau de valversnelling meet, dan is de afstand tot het massamiddelpunt van de aarde groter en zul je dus een lagere waarde meten. Als de hoogte h waarop je je bevindt klein is ten opzichte van de straal R van de aarde, dan is de verandering van de valversnelling te benaderen met:

$$\delta g_{\text{hoogte}} = -\frac{2 \cdot g \cdot h}{R}$$

Hierin is:
- $\boldsymbol{\delta g_{\text{hoogte}}}$ de verandering van de valversnelling ten gevolge van de hoogte in meter per seconde kwadraat (m s^{-2});
- h de hoogte boven zeeniveau in meter (m);
- g de valversnelling op zeeniveau voor een bolvormige aarde in meter per seconde kwadraat (m s^{-2});
- R de straal van de aarde in meter (m).

De δ (kleine letter delta) geeft aan dat het om een kleine afwijking gaat. Voor δg_{hoogte} wordt meestal een standaardwaarde gebruikt gebaseerd op een perfect ronde, niet roterende aarde. In dat geval geldt:

$$\delta g_{\text{hoogte}} = -3{,}086 \cdot 10^{-6} \cdot h$$

Als je in een gebergte de valversnelling meet, moet je rekening houden met de aantrekkingskracht van de ‘extra’ massa onder je van het gesteente waaruit het gebergte is opgebouwd.
Dit zorgt ervoor dat de zwaartekracht sterker is. De correctie voor de gravitatiekracht van het gebergte kun je berekenen. Deze wordt **Bouguer-correctie** genoemd. Als je aanneemt dat het

gebergte uit graniet bestaat en het gebergte zich als een vlakke plaat oneindig ver uitstrekt, dan bedraagt de Bouguer-correctie:

$\delta g_B = 1{,}119 \cdot 10^{-6} \cdot h$

Hierin is:
- δg_B de Bouguer-correctie in meter per seconde kwadraat ($m\,s^{-2}$);
- h de dikte van het gebergte boven zeeniveau in meter (m).

Tot slot moet je nog corrigeren voor de breedtegraad waarop je je bevindt, de getijdenwerking en hoogteverschillen in het terrein (reliëf, dus afwijkingen van de vlakke plaat). Omdat die correcties ingewikkelder zijn, hoef je alleen te weten hoe je rekening houdt met de hoogte- en Bouguer-correcties. De gecorrigeerde meting bereken je dan als:

$g_{corr} = g_{meting} - \delta g_{hoogte} - \delta g_B$

Hierin is:
- g_{corr} de gecorrigeerde valversnelling in meter per seconde kwadraat ($m\,s^{-2}$);
- g_{meting} de gemeten valversnelling in meter per seconde kwadraat ($m\,s^{-2}$).

Deze correctie moet dus uitgevoerd worden als je op het land een meting doet. De afwijking tussen de gecorrigeerde waarde en de waarde die je verwacht op basis van een homogene, bolvormige aarde geeft informatie over dichtheidsverschillen in de bodem.

Voorbeeldopgave 1

Op een hoogvlakte op 1200 m boven zeeniveau wordt een valversnelling gemeten van 9,803 547 $m\,s^{-2}$. De valversnelling op basis van een homogene, bolvormige aarde bedraagt 9,805 914 $m\,s^{-2}$.

a Bereken de gecorrigeerde valversnelling.

b Welke conclusie kun je trekken uit het verschil in de gecorrigeerde valversnelling en de valversnelling van een homogene bolvormige aarde?

Uitwerking

a $g_{corr} = g_{meting} - \delta g_{hoogte} - \delta g_B$

$\delta g_{hoogte} = -3{,}086 \cdot 10^{-6} \cdot h = -3{,}086 \cdot 10^{-6} \times 1200 = -3{,}703 \cdot 10^{-3}\ m\,s^{-2}$
$\delta g_B = 1{,}119 \cdot 10^{-6} \cdot h = 1{,}119 \cdot 10^{-6} \times 1200 = 1{,}343 \cdot 10^{-3}\ m\,s^{-2}$
$g_{corr} = g_{meting} - \delta g_{hoogte} - \delta g_B$
$= 9{,}803\,547 + 0{,}003\,703 - 0{,}001\,343$
$= 9{,}805\,907\ m\,s^{-2}$

b De gecorrigeerde valversnelling is lager dan je zou verwachten op basis van een homogene, bolvormige aarde. Dat kan verklaard worden door holtes die zich in de bodem van de hoogvlakte bevinden, of doordat de hoogvlakte uit materiaal bestaat met een lagere dichtheid dan graniet (waar de Bouguer-correctie vanuit gaat).

Onthoud!

- De valversnelling is niet overal op aarde gelijk doordat de aarde niet bolvormig is, doordat de aarde om haar as draait, door getijdenwerking, door hoogteverschillen en reliëf, en door verschillen in samenstelling van de aarde.
- Sommige gesteenten hebben een hogere dichtheid dan andere gesteenten. Dit kan met zwaartekrachtmetingen worden gedetecteerd.
- Als de zwaartekracht op een bepaalde hoogte wordt gemeten, wordt er gecorrigeerd voor de hoogte boven zeeniveau (δg_{hoogte}) en de massa van het gesteente tussen de meting en zeeniveau (δg_B, de Bouguer-correctie). Daarnaast moet gecorrigeerd worden voor het reliëf, de breedtegraad en de getijdenwerking.

Opdrachten

7 Zwaartekrachtmetingen
Zwaartekrachtmetingen kunnen worden gebruikt om de eigenschappen van een gesteente te bepalen.
Leg uit welke eigenschap je uit deze metingen kunt afleiden.

8 Correctiefactor voor hoogte en gesteente
De ‘correctiefactoren’ δg_{hoogte} en δg_B hebben een verschillend teken.
a Leg uit waarom het teken verschillend is voor deze twee correcties.

Deze twee correcties worden vaak gecombineerd.
b Leg uit in welke situatie de twee correcties gecombineerd kunnen worden en in welke situatie niet.
c Stel één formule op voor de combinatie van deze twee correcties.

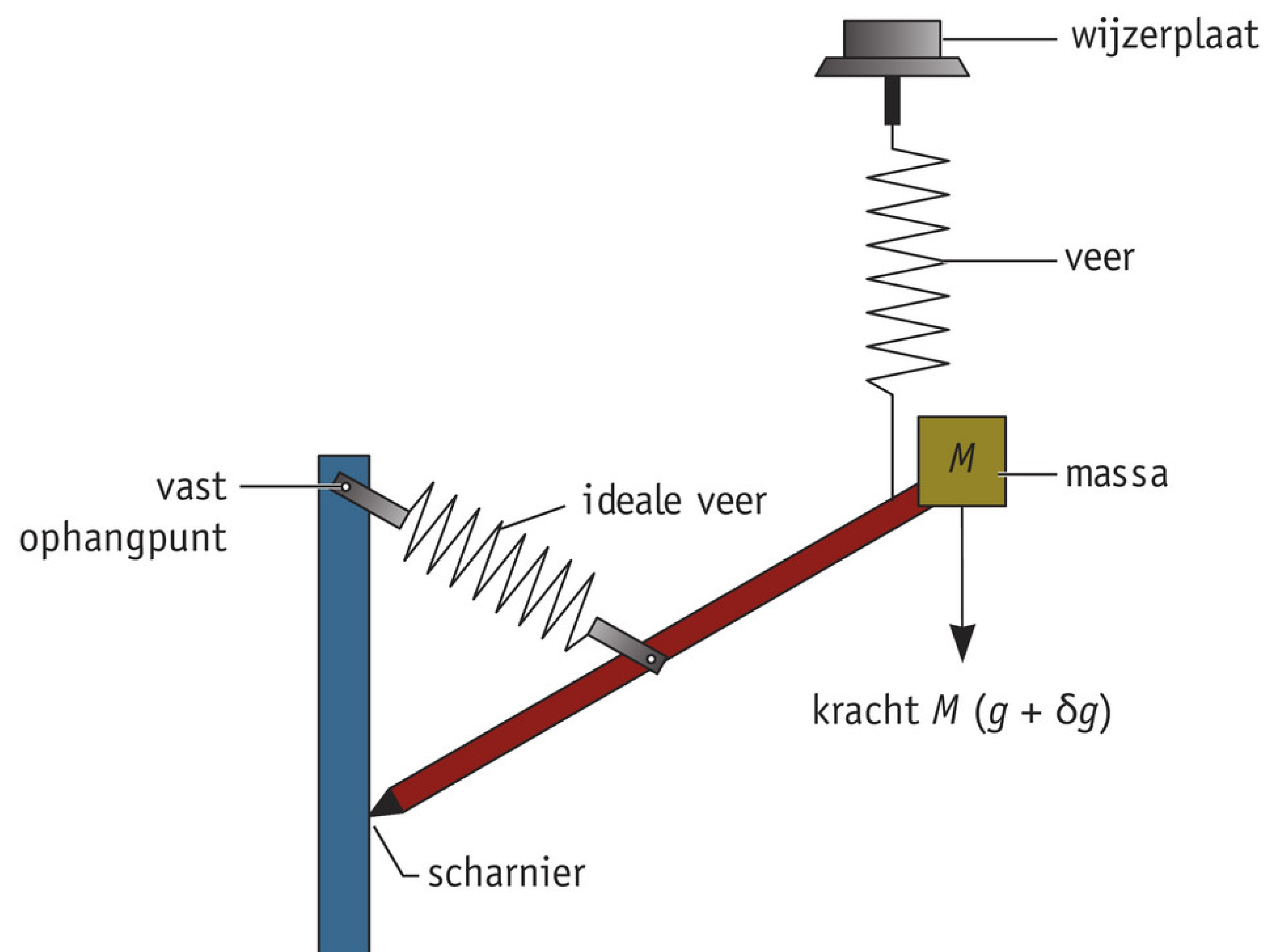
9 Bouguer-correctie
In de formule voor de Bouguer-correctie komt een constante voor.
a Leid af welke eenheid deze constante moet hebben.

De algemene formule voor de Bouguer-correctie is: $\delta g_B = 2\pi \cdot G \cdot \rho \cdot h$. Hierin is ρ de dichtheid van het gesteente met dikte h dat zich tussen meting en zeeniveau bevindt.
b Bereken de waarde van de constante voor de Bouguer-correctie die uit deze formule volgt. Vergelijk je uitkomst met de waarde gegeven in de paragraaf en geef een verklaring voor een eventueel verschil.

10 Gravitatieversnellingen op aarde
In Binas tabel 30B vind je metingen van de gravitatieversnelling voor verschillende plaatsen op aarde.
a Geef een verklaring voor het verschil tussen de waarde voor de polen en de evenaar.
b Bereken op basis van de formules uit de theorie de waarde van g in Johannesburg.
c Vergelijk je antwoord bij opdracht b met de waarde in Binas tabel 30B en geef een verklaring voor een eventueel verschil.

11 Gravimeter

Een gravimeter werkt met een bekende massa die aan een veer is opgehangen (figuur 5). Als de zwaartekracht op deze massa groter is, zal de veer iets verder uitrekken. Door deze uitrekking zo nauwkeurig mogelijk te meten kan de valversnelling berekend worden.



▲ **figuur 5** principe van een gravimeter

De massa van *M* in figuur 5 is 1,00 kg. Bij $g = 9{,}81\ \text{m s}^{-2}$ is de uitrekking van de veer 30,0 cm.

a Bereken de uitrekking van de veer als $g = 9{,}78\ \text{m s}^{-2}$. Neem aan dat de veer voldoet aan de wet van Hooke. Negeer het effect van de extra veer in figuur 5.

Moderne gravimeters kunnen een verschil van $1 \cdot 10^{-7}\ \text{m s}^{-2}$ meten.

b Bereken de uitrekking van de gravimeter in figuur 5 bij $g = 9{,}810\,000\,1\ \text{m s}^{-2}$.

De bij opdracht b gevonden uitwijking van de veer is te klein om waar te nemen.

c Bedenk een mechanisme om de uitwijking van de veer te vergroten zodat deze wel kan worden afgelezen.

+12 Invloed van het reliëf

Het reliëf op het aardoppervlak geeft ook een afwijking op de gemeten valversnelling, $\delta g_{\text{reliëf}}$. Beredeneer wat het teken zal zijn van $\delta g_{\text{reliëf}}$ ten gevolge van:

a een hoge berg in de buurt van de meting;

b een diep dal in de buurt van de meting.

+13 Invloed van de breedtegraad

Om te corrigeren voor de vorm en de draaiing van de aarde wordt de volgende formule gebruikt:

$g_\lambda = 9{,}780\,318\,(1 + 0{,}005\,302\,4 \cdot \sin^2\lambda - 0{,}000\,005\,9 \cdot \sin^2 2\lambda)$

Hierin is λ de breedtegraad.

a Gebruik de gegeven formule om de waarden voor *g* in Binas te controleren voor de evenaar en de Noordpool.

b Gebruik alle in deze paragraaf besproken correcties om de waarde voor *g* in Johannesburg te controleren. Geef een verklaring voor een mogelijk verschil.

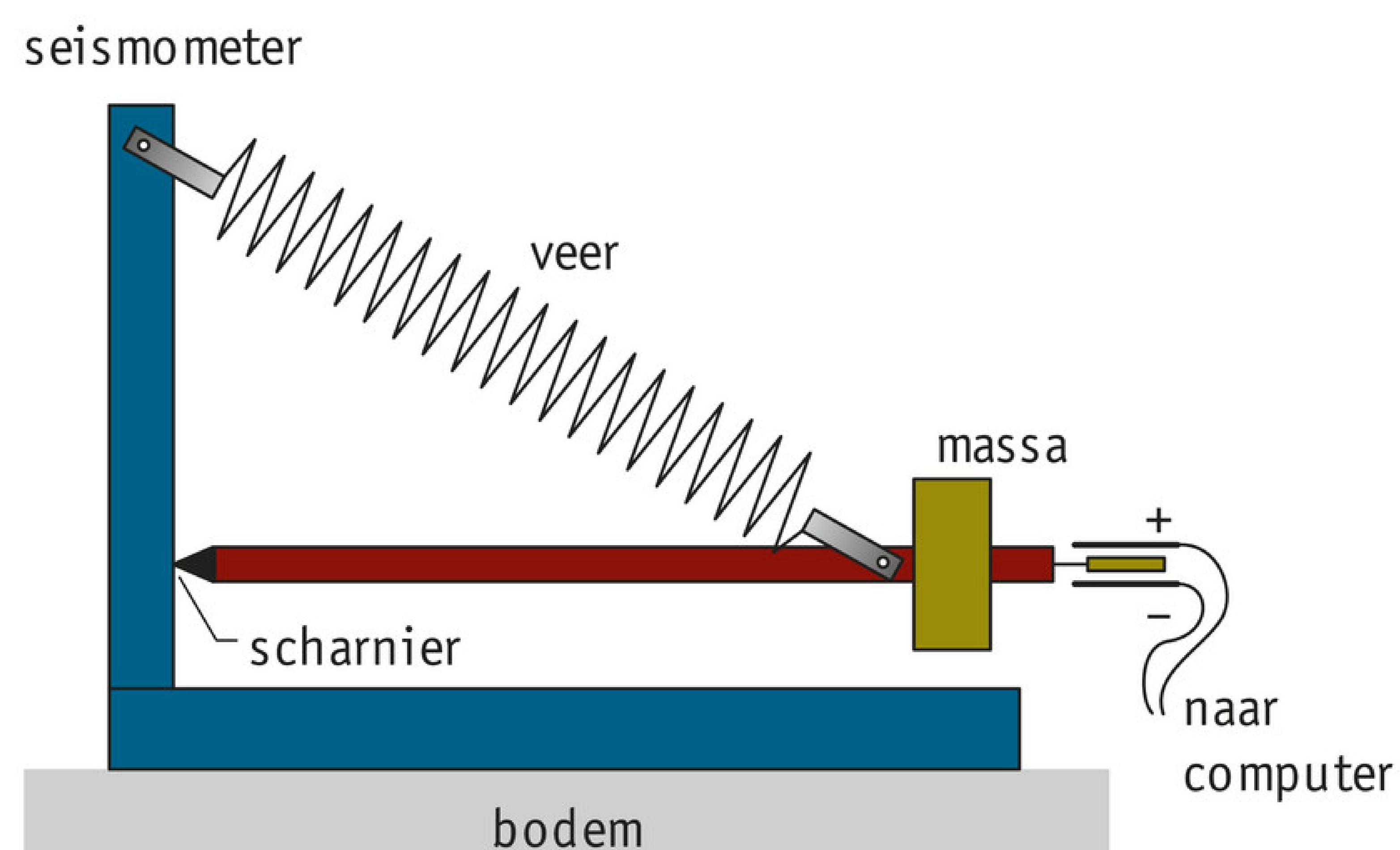
3 Seismologie en seismiek

In deze paragraaf leer je:
- het verschil en de overeenkomst tussen seismologie en seismiek;
- dat er bij aardbevingen verschillende trillingen ontstaan met verschillende eigenschappen;
- hoe met seismiek onderzoek wordt gedaan naar de structuur van de bodem en de aanwezigheid van delfstoffen.

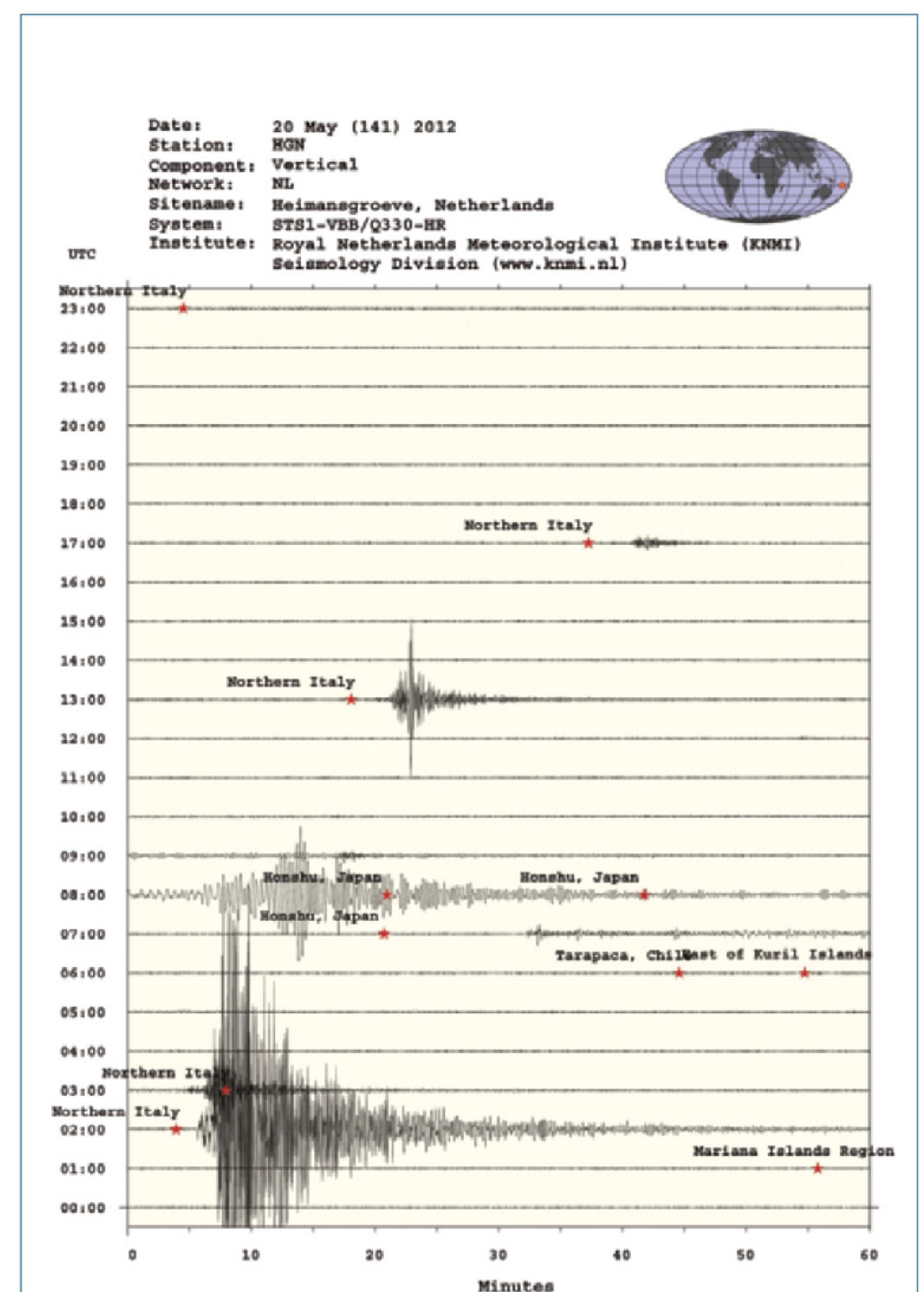
Door te meten hoe trillingen zich in de aarde voortplanten kunnen geofysici het inwendige van de aarde bestuderen. Vaak wordt gebruikgemaakt van de trillingen afkomstig van aardbevingen. Dit wordt **seismologie** genoemd. Geofysici kunnen ook zelf trillingen opwekken om onderzoek te doen aan de bodem. In dat geval spreek je van **seismiek**.

Seismologie

Dagelijks vinden er vele aardbevingen plaats in de aarde. De meeste aardbevingen zijn licht en veroorzaken weinig of geen schade, zodat ze niet in het nieuws komen. De trillingen die door een aardbeving worden opgewekt, bewegen zich als golven door de aarde en kunnen op andere plekken met seismometers worden gemeten. Een **seismometer** bestaat uit een massa die los van het aardoppervlak hangt (figuur 6). Door de traagheid blijft de massa op dezelfde plek, terwijl de rest van de seismometer met het aardoppervlak meebeweegt. Door het meten van de beweging van de massa ten opzichte van de rest van de seismometer krijg je een **seismogram**, dat de beweging van het aardoppervlak laat zien (figuur 7).



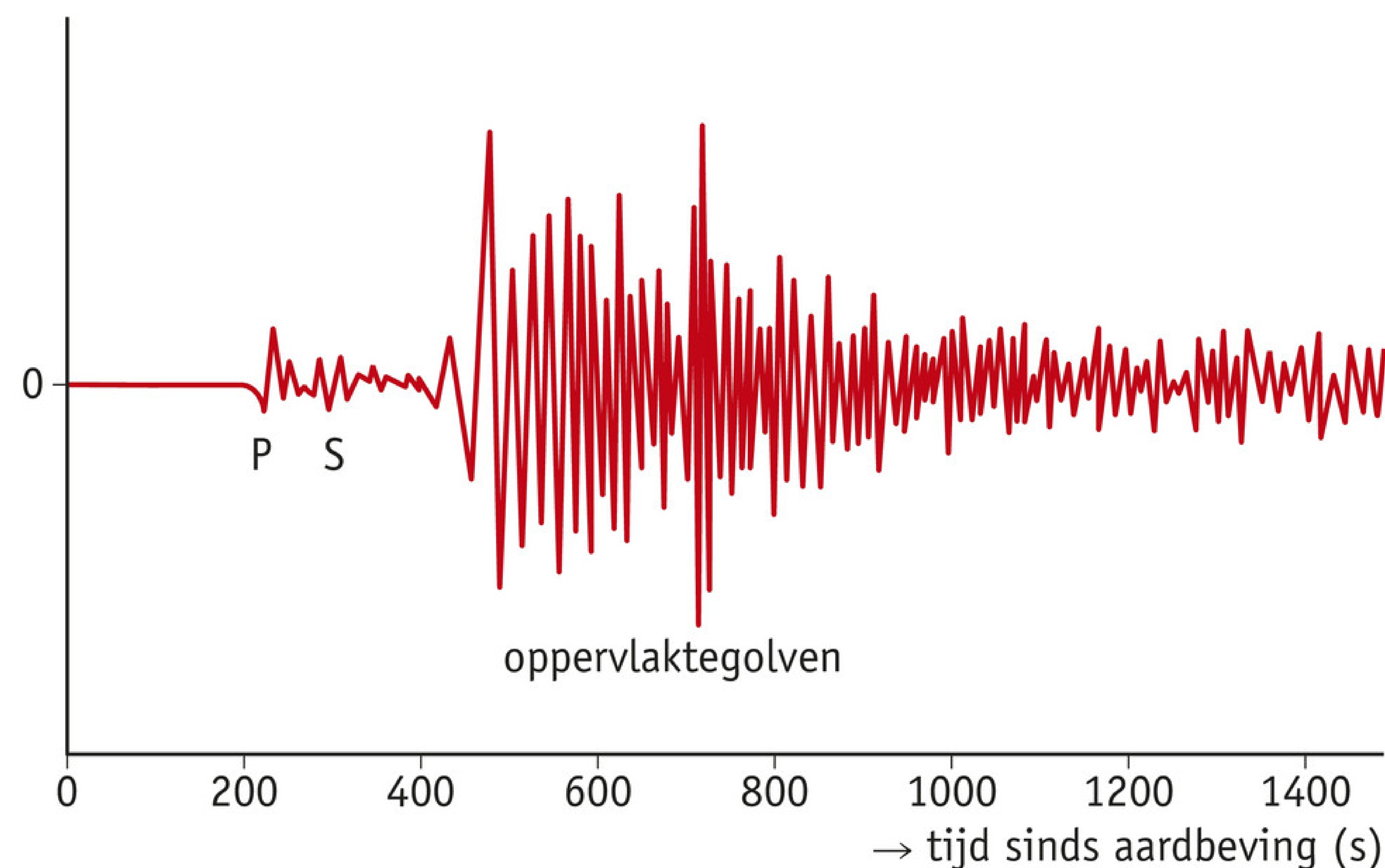
▲ **figuur 6** bouw van een seismometer



▲ **figuur 7** voorbeeld van een seismogram dat gemaakt is in Zuid-Limburg

Soorten trillingen

De trillingen die door een aardbeving worden opgewekt, bestaan uit verschillende soorten golven. De belangrijkste zijn: P-golven, S-golven en oppervlaktegolven. **P-golven** hebben de grootste snelheid en worden in een seismogram het eerst gedetecteerd. De P staat voor 'primary', ofwel 'eerste'. **S-golven** hebben een kleinere snelheid en komen later aan. S staat voor 'secondary', ofwel 'tweede'. Uit het tijdverschil tussen de aankomst van de P- en de S-golven kun je een indicatie krijgen van de afstand tot de aardbeving. P-golven en S-golven gaan dwars door de aarde heen. Naarmate de afstand groter is, neemt de sterkte van de trillingen af. **Oppervlaktegolven** verplaatsen zich door de aardkorst. Daardoor neemt de sterkte van de trillingen minder sterk af dan bij P- en S-golven. In het seismogram komen ze als laatste aan en geven de grootste uitwijking (figuur 8). Het zijn de oppervlaktegolven die voor de schade zorgen bij aardbevingen.



▲ **figuur 8** detail van een seismogram waarin een aardbeving wordt geregistreerd

Voorbeeldopgave 2

P-golven hebben in de aardkorst een gemiddelde snelheid van $v_P = 6{,}0 \cdot 10^3$ m s^{-1}. S-golven hebben een gemiddelde snelheid van $v_S = 3{,}5 \cdot 10^3$ m s^{-1}. In een seismogram komen de S-golven 20 s later aan dan de P-golven.
Bereken op welke afstand de aardbeving plaatsvond.

Uitwerking
Neem aan dat de P-golven aankomen na een tijd t_P. De S-golven komen dan aan op $t_S = t_P + \Delta t$, met $\Delta t = 20$ s. De P-golven hebben een afstand afgelegd van $6{,}0.10^3 \cdot t_P$.
De S-golven hebben een afstand afgelegd van $3{,}5.10^3 \cdot (t_P + 20)$. Deze twee afstanden moeten gelijk zijn:
$6{,}0 \cdot 10^3 \cdot t_P = 3{,}5 \cdot 10^3 \cdot (t_P + 20)$
Oplossen geeft:
$(6{,}0 \cdot 10^3 - 3{,}5 \cdot 10^3) \cdot t_P = 3{,}5 \cdot 10^3 \times 20$

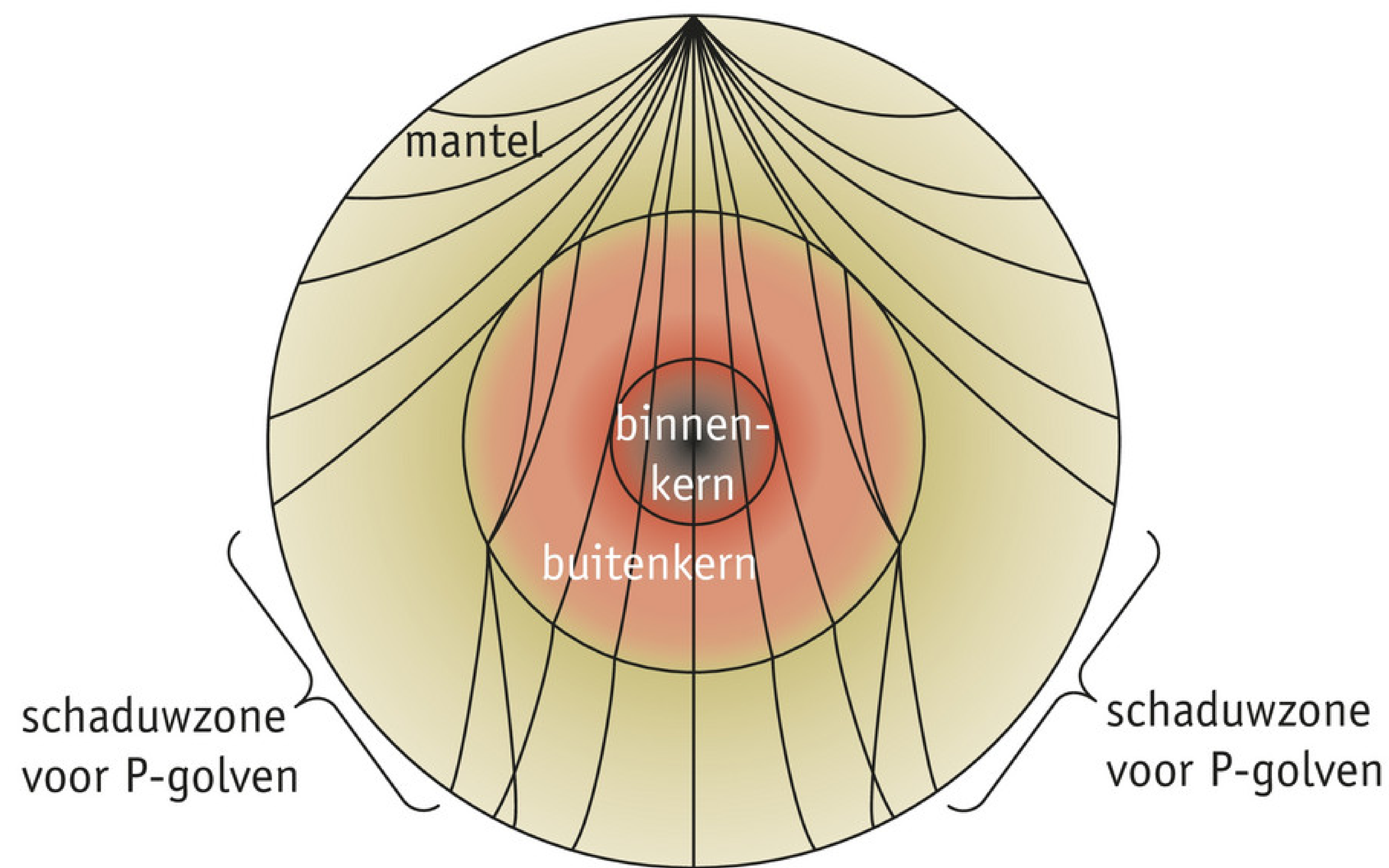
$$t_P = \frac{3{,}5 \cdot 10^3 \times 20}{6{,}0 \cdot 10^3 - 3{,}5 \cdot 10^3} = 28 \text{ s}$$

De afstand tot de aardbeving is dan: $s = v_P \cdot t_P = 6{,}0 \cdot 10^3 \times 28 = 1{,}7 \cdot 10^5$ m.

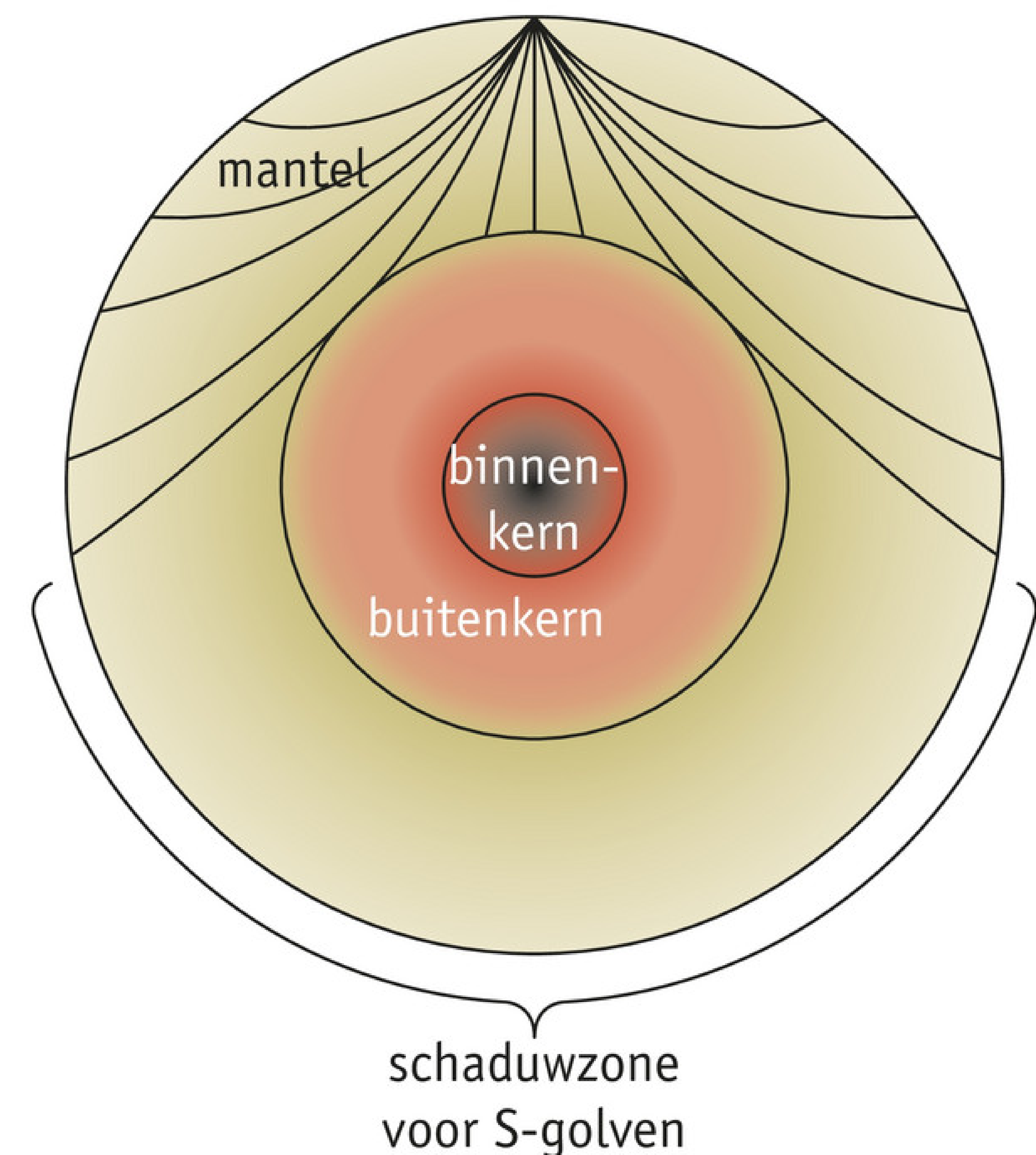
Paden van seismische golven

De dichtheid van de gesteenten in de aarde neemt toe als je dieper komt. Daardoor wordt de snelheid van seismische golven groter met toenemende diepte. De seismische golven volgen

daardoor een pad dat gebogen is. Hetzelfde verschijnsel vindt plaats bij licht, waarbij breking optreedt bij de overgang van bijvoorbeeld lucht naar water.
De buitenkern is vloeibaar en de snelheid van P-golven is daar een stuk lager dan in de mantel, die vast is. Het gevolg is dat P-golven sterk breken op de overgang van mantel naar buitenkern (figuur 9). Daardoor ontstaat een zogenoemde **schaduwzone** waar geen rechtstreekse P-golven van een aardbeving terechtkomen. S-golven gaan helemaal niet door een vloeistof heen. Ze komen dus niet door de vloeibare buitenkern heen. De schaduwzone voor S-golven is daarom groter dan die voor P-golven (figuur 10).
Naast breking ontstaan er bij abrupte overgangen, zoals van de mantel naar de buitenkern, ook reflecties. De golven worden daar zoals licht op een spiegel weerkaatst. De breking en reflectie van trillingen door de aarde kunnen samen gebruikt worden om een beeld te maken van het inwendige van de aarde.



▲ **figuur 9** ontstaan van een schaduwzone voor P-golven



▲ **figuur 10** ontstaan van een schaduwzone voor S-golven

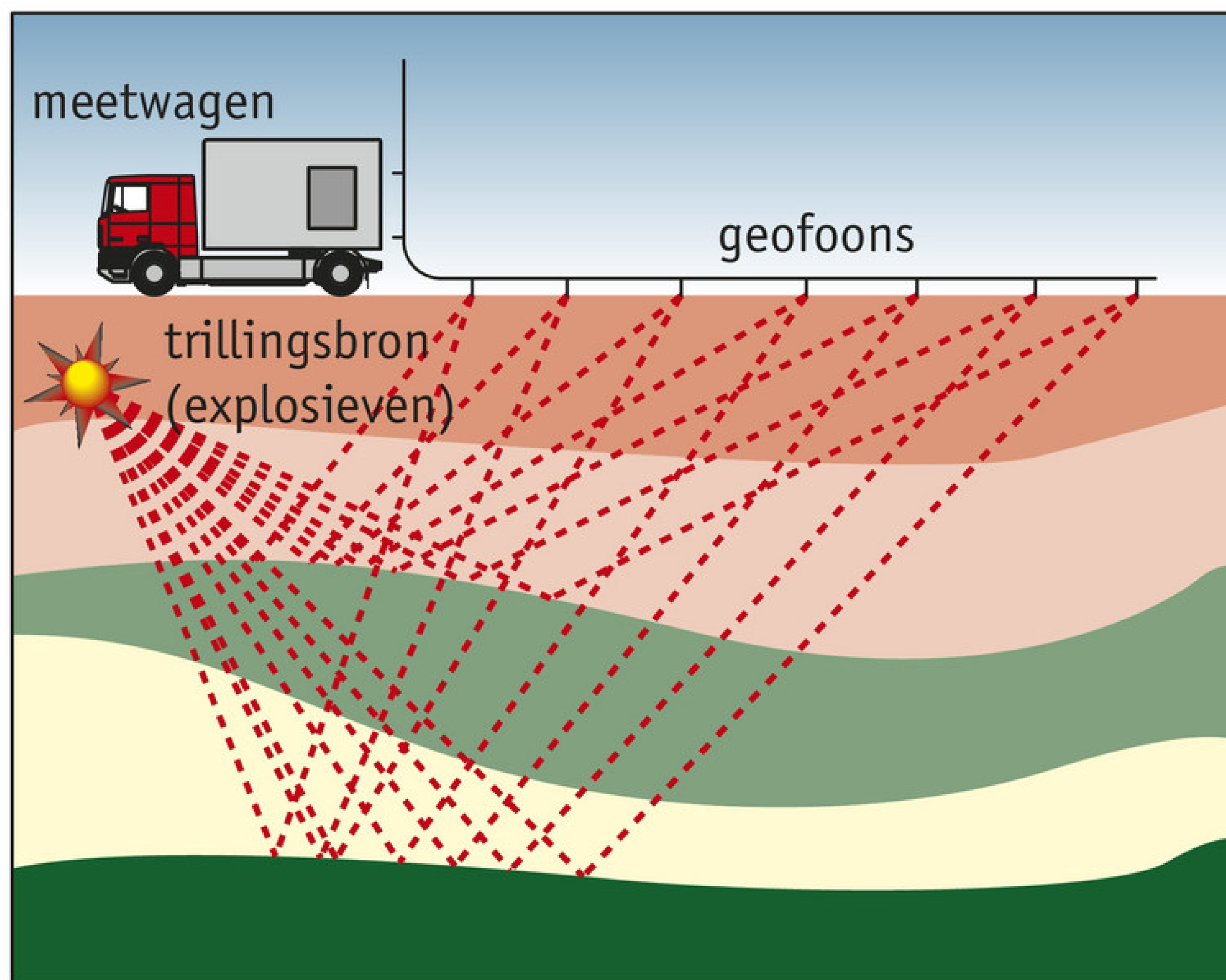
Seismiek

Bij seismiek worden kunstmatig trillingen opgewekt om de structuur van de bodem te bepalen. Voor het opsporen van olie- en gasvelden maakt men bijvoorbeeld gebruik van trillingen die met explosieven worden opgewekt of met behulp van speciale, zware vrachtwagens. Tussen de voor- en achterwielen van deze vrachtwagens zit een trilplaat (figuur 11). Met een pneumatisch systeem wordt de vrachtwagen opgetild, zodat deze op de trilplaat steunt. Door vervolgens de hele vrachtwagen te laten trillen, worden via die plaat trillingen de grond in gestuurd. In sommige gevallen kan worden volstaan met trillingen die worden opgewekt door met een moker op een plaat te slaan.

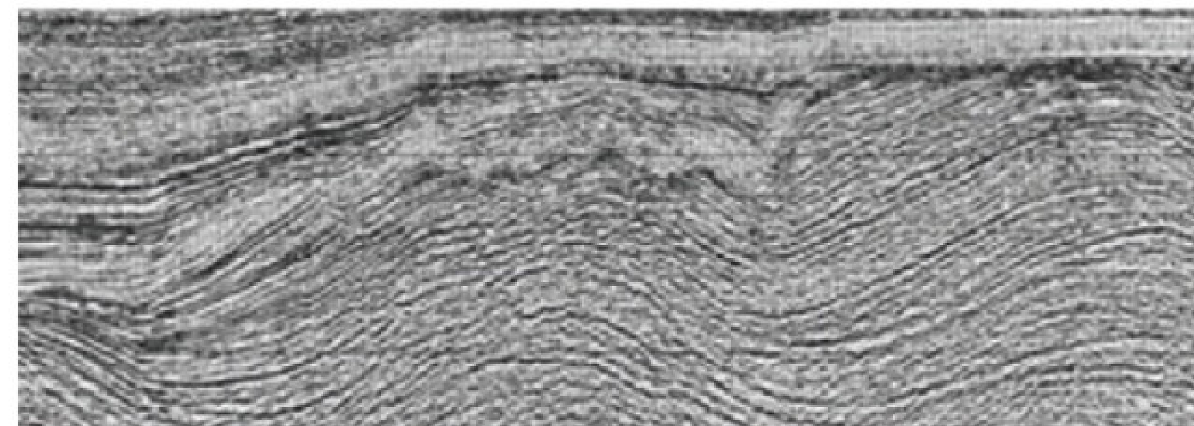


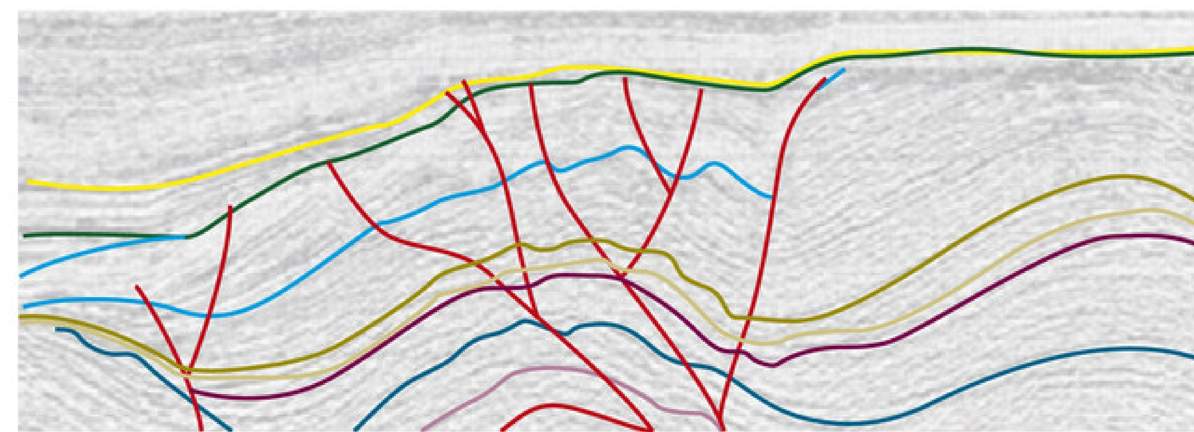
◀ **figuur 11** De trilplaat veroorzaakt seismische trillingen.

De trillingen worden vervolgens opgevangen met zogenoemde **geofoons**, seismometers die gemakkelijk verplaatst kunnen worden (figuur 12). De trillingen worden deels gereflecteerd en deels afgebogen. Door de signalen van meerdere geofoons met elkaar te vergelijken kan een beeld worden samengesteld van de opbouw van de bodem (figuur 13).



▲ **figuur 12** hoe reflecties aankomen bij geofoons





▲ **figuur 13** boven: het beeld zoals dat van de geofoons komt; onder: interpretatie van de ligging van lagen in de bodem

▶ **EXPERIMENT 1** Trillingen meten met een versnellingsmeter (begripspracticum)

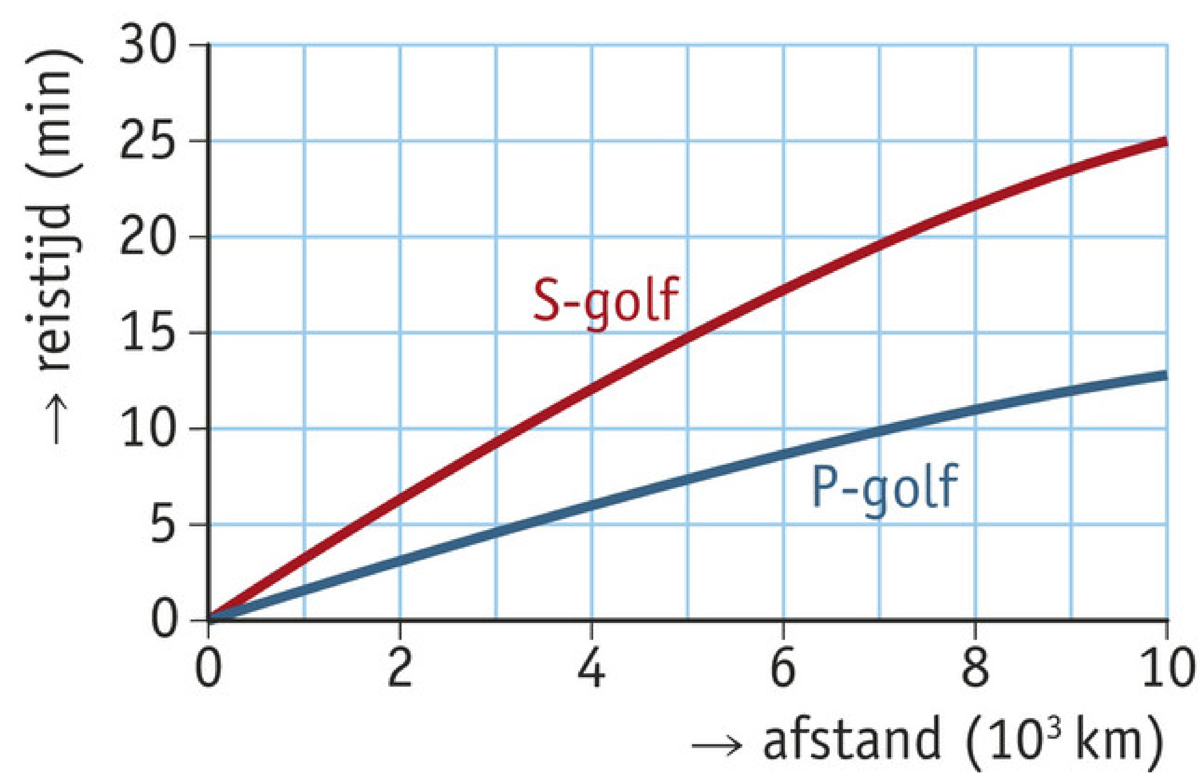
Onthoud!

- Seismologie is het onderzoek naar aardbevingen en de trillingen die daardoor veroorzaakt worden.
- Bij een aardbeving ontstaan P-golven, S-golven en oppervlaktegolven. De P-golven hebben de grootste snelheid, de oppervlaktegolven de kleinste. Uit het verschil in aankomsttijd tussen de P- en de S-golven is de afstand tot de aardbeving af te leiden.
- Door buiging ontstaat er een schaduwzone voor P-golven. S-golven kunnen niet door een vloeistof heen en hebben daardoor een nog grotere schaduwzone.
- Seismiek is een methode waarbij geofysici trillingen opwekken en daarmee de structuur van de bodem onderzoeken.
- Voor onderzoek naar de structuur van de ondergrond wordt gekeken naar reflecties van seismische trillingen die worden opgevangen met geofoons.

Opdrachten

14 Seismometer
In een seismometer bevindt zich een blok met een grote massa.
a Leg uit waarom dit blok vrij moet kunnen bewegen.
b Leg uit waarom het blok het best een zo groot mogelijke massa heeft.

15 Afstand tot aardbeving
In een seismogram komt de S-golf 350 s later binnen dan de P-golf.
a Bereken de afstand tot de aardbeving op de manier van voorbeeldopgave 2.
b Gebruik figuur 14 om de afstand tot de aardbeving te bepalen.



▲ **figuur 14** reistijden van P- en S-golven voor een bepaalde afstand langs het aardoppervlak

c Vergelijk je antwoorden op opdracht a en b en geef een verklaring voor een eventueel verschil.

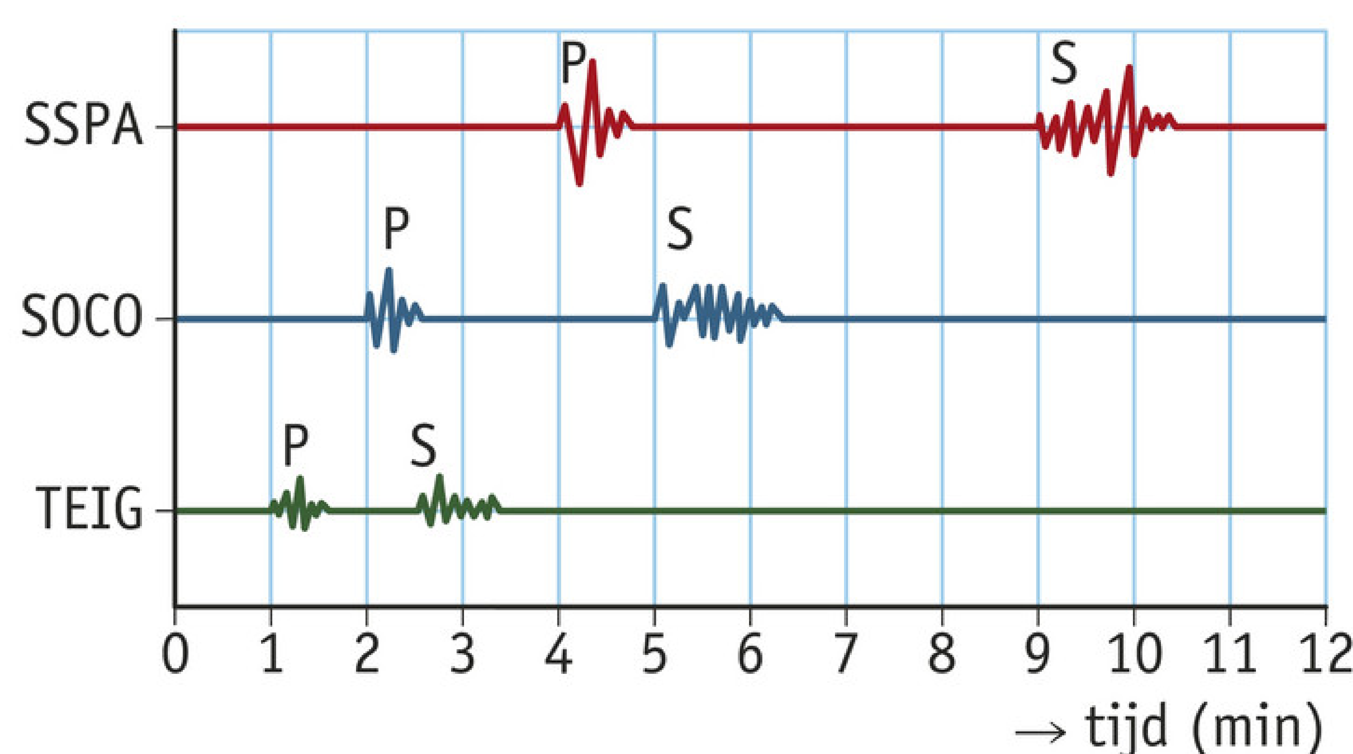
16 Snelheid S- en P-golven
S- en P-golven hebben een verschillende snelheid die bovendien verandert met de diepte. Bepaal met behulp van figuren 9, 10 en 14 of P- en S-golven dieper in de aarde een hogere of juist lagere snelheid hebben.

17 Seismogram
Bij een seismogram, zoals in figuur 13, zijn de trillingen gemeten door een groot aantal geofoons naast elkaar gezet. De trillingen die door één geofoon zijn opgevangen staan verticaal. De horizontale as geeft de positie van de geofoons weer. Je krijgt daardoor een beeld van de lagen die de golven reflecteren. De verticale as lijkt overeen te komen met de diepte, maar in feite wordt er een andere grootheid gemeten.

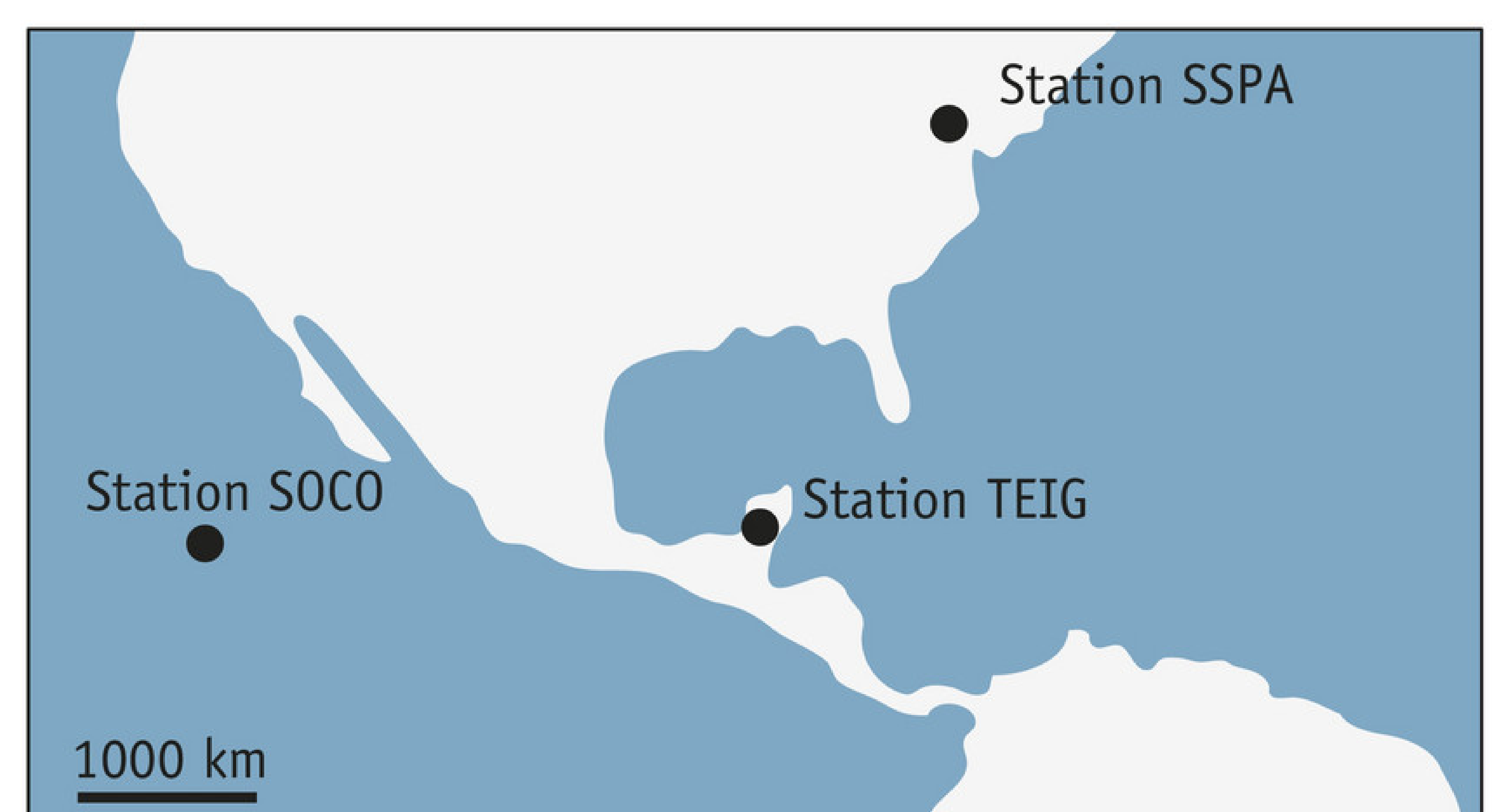
a Welke grootheid wordt er gemeten en moet dus langs de verticale as staan?
b Leg uit wat het verschil is met een profiel waar werkelijk de diepte langs de verticale as staat.

18 Locatiebepaling aardbeving
In figuur 15 zie je drie seismogrammen waarin de aankomst van de P- en de S-golven is aangegeven. Figuur 16 is een kaart van de ligging van de drie meetstations. Gebruik bij deze opdracht figuur 14.

a Bepaal hoe ver elk van de drie meetstations van de aardbeving af ligt.
b Bepaal met de kaart in figuur 15 waar de aardbeving moet hebben plaatsgevonden.
c Bereken voor elk van de drie meetstations hoe groot de gemiddelde snelheid van de P-golf is geweest.
d Leg uit waarom de drie snelheden die je bij opdracht c berekend hebt, hetzelfde of juist niet hetzelfde zijn.



▲ **figuur 15** seismogrammen van dezelfde aardbeving, waargenomen door drie verschillende meetstations



▲ **figuur 16** ligging van de meetstations uit figuur 15

+19 Schaduwzone S-golven
In figuur 10 is de schaduwzone voor S-golven te zien.
Bepaal uit figuur 10 de grootste afstand waarop met behulp van tijdverschillen tussen P- en S-golven de afstand tot de aardbeving bepaald kan worden.

4 Warmte

In deze paragraaf leer je:
- dat de temperatuur van de aarde een gevolg is van verschillende warmtebronnen;
- hoe de temperatuur als functie van de diepte in de aarde verloopt;
- de eigenschappen van verschillende lagen in de aarde verklaren op basis van de smelttemperatuur van gesteenten en de heersende temperatuur in de aarde;
- wat convectie is en welke rol deze vorm van warmtetransport speelt in de processen in de aarde.

De temperatuur in het binnenste van de aarde is hoger dan aan het oppervlak. Dit is zichtbaar in vulkanische gebieden. Op die plekken komt vloeibaar gesteente naar boven. Blijkbaar is de temperatuur op een bepaalde diepte zo hoog dat sommige gesteenten kunnen smelten.

Oorsprong van de warmte

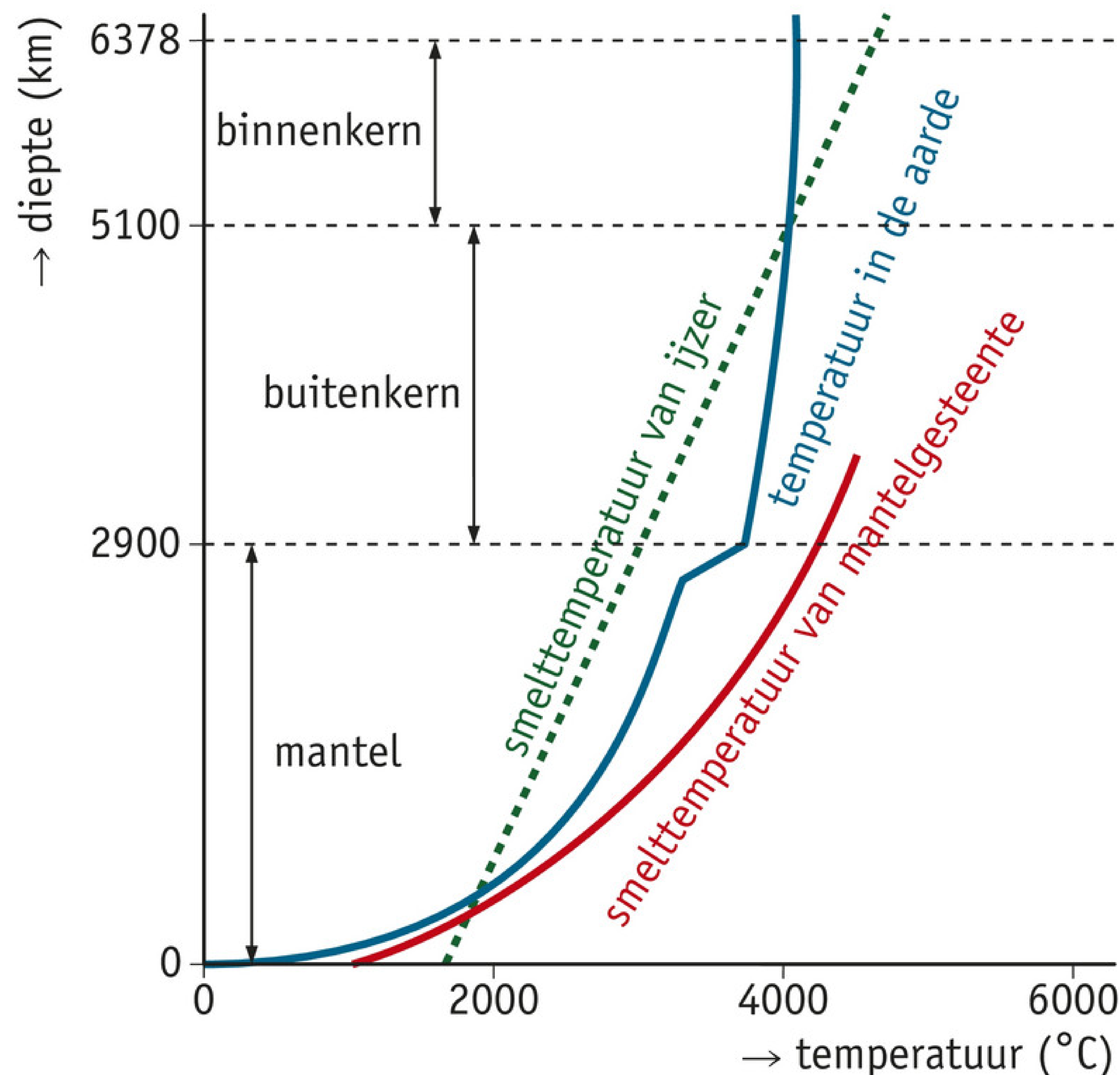
Een planeet zoals de aarde ontstaat doordat stof en brokken steen samenklonteren onder invloed van de zwaartekracht. De zwaarte-energie en de kinetische energie die de brokken steen daarbij verliezen, worden omgezet in warmte, waardoor de planeet in wording opwarmt. Zodra de planeet gevormd is, begint hij af te koelen. Door de omvang van de planeet en doordat het gesteente warmte niet goed geleidt, duurt het heel lang voordat de gehele planeet is afgekoeld.
In 1862 berekende de natuurkundige Lord Kelvin hoe oud de aarde zou kunnen zijn op basis van dat afkoelen. Zo kwam hij op een leeftijd tussen de veertig miljoen en tweehonderd miljoen jaar. Geologen en biologen uit zijn tijd betwijfelden deze uitkomst: de aarde moest veel ouder zijn om de vorming van geologische structuren en de evolutie van soorten mogelijk te maken.
Begin twintigste eeuw werd op basis van radioactief verval bepaald dat de aarde al zo'n 4,6 miljard jaar oud moest zijn. Lord Kelvin had wel goed gezien hoe de aarde afkoelt, maar hij had geen rekening gehouden met andere warmtebronnen in de aarde.

Andere warmtebronnen

De belangrijkste warmtebron binnen in de aarde is het **verval** van radioactieve stoffen die zich in de gesteenten in de aarde bevinden, voornamelijk uranium en thorium. Deze radioactieve stoffen waren al aanwezig in het materiaal waaruit de aarde ontstond. Radioactiviteit was in de tijd van Lord Kelvin nog niet bekend, waardoor hij op een veel te lage leeftijd van de aarde uitkwam.
Er zijn nog andere warmtebronnen die ervoor zorgen dat het inwendige van de aarde opgewarmd wordt. Zo werken er door de maan en de zon getijdenkrachten op de aarde. Door deze krachten wordt de aarde als een stressballetje gekneed. Door deze vervormingen komt er warmte vrij.

Temperatuur van de aarde

Uit seismische metingen en laboratoriumonderzoek naar het gedrag van gesteenten onder extreme omstandigheden is het temperatuurverloop in de aarde afgeleid (figuur 17). De temperatuur neemt met diepte toe, hoewel niet altijd even sterk. In figuur 17 is aangegeven bij welke temperatuur mantelgesteenten en ijzer zullen smelten. Dieper in de aarde is de smelttemperatuur hoger omdat de druk er veel hoger is.



▲ **figuur 17** de temperatuur in de aarde vergeleken met het smeltpunt van mantelgesteente en ijzer

In de lithosfeer, dicht bij het aardoppervlak, is de temperatuur nog een stuk lager dan de smelttemperatuur van mantelgesteente. Daardoor is de lithosfeer vast. Op een bepaalde diepte komt de temperatuur dicht bij de smelttemperatuur van mantelgesteente, maar ligt er nog wel onder. Op die diepte begint de asthenosfeer, die daardoor gemakkelijk vervormbaar is.
Met het toenemen van de diepte neemt niet alleen de temperatuur toe, maar ook de druk. Bij een hogere druk zal de smelttemperatuur van een stof ook toenemen. Het gevolg is dat op grotere diepte in de mantel het gesteente weer vast is. In de buitenkern, die bestaat uit ijzer en nikkel, ligt de temperatuur boven de smelttemperatuur van ijzer: de buitenkern is vloeibaar. In de binnenkern duikt de temperatuur onder de smelttemperatuur van ijzer, waardoor de binnenkern vast is.

Convectie

Warmte kan worden getransporteerd door middel van straling, geleiding of stroming. In het inwendige van de aarde is het niet goed mogelijk om warmte door straling te laten ontsnappen. Het warmtetransport vindt dus plaats door geleiding en stroming. Stroming is een zeer efficiënte manier van warmtetransport. In een vloeistof die aan de onderkant verwarmd wordt, zoals een pan soep, stijgt de opgewarmde vloeistof op, terwijl afgekoelde vloeistof van het oppervlak naar beneden zakt. Deze manier van warmtetransport wordt **convectie** genoemd.
De aardmantel bestaat grotendeels uit vaste gesteenten. Toch is de temperatuur zo hoog dat de mantelgesteenten op grote schaal en over langere tijden enigszins kunnen vervormen. Hierdoor kan warmtetransport door de mantel ook door convectie plaatsvinden. Uit seismologisch onderzoek blijkt dat er gebieden in de mantel zijn waar seismische golven een hoge snelheid hebben. Dit zouden afgekoelde gesteenten kunnen zijn die in de mantel wegzakken. Op andere plekken zijn de snelheden juist klein, op die plekken ligt de temperatuur van het gesteente dichter bij het smeltpunt. Dit gesteente stijgt op en voert de warmte van het onderste deel van de mantel af.

Onthoud!

- De warmte in het inwendige van de aarde is voor een deel een overblijfsel uit de tijd dat de aarde gevormd werd. Voor een ander deel komt er warmte vrij bij verval van radioactieve stoffen en de vervormingen in de aarde door de getijdenkrachten van de zon en de maan.
- De temperatuur in de aarde neemt toe met de diepte. In de buitenkern ligt de temperatuur boven het smeltpunt van ijzer. Het smeltpunt stijgt als de druk hoger wordt. De binnenkern is daardoor vast, ondanks de hogere temperatuur die daar heerst.
- De asthenosfeer is niet gesmolten, maar kan wel gemakkelijk vervormen doordat de temperatuur dicht bij de smelttemperatuur van mantelgesteenten ligt. De rest van de mantel is vast, maar kan toch voldoende vervormen om convectie mogelijk te maken.

Opdrachten

20 Leeftijd van de aarde
Lord Kelvin berekende een veel te lage leeftijd van de aarde.
Leg uit waarom zijn berekening niet klopte.

21 Vast of vloeibaar
De onderkant van de mantel is vast, terwijl de daaraan grenzende buitenkern gesmolten is.
Geef hiervoor een verklaring.

22 Snelheid seismische golven
Op sommige plekken, zoals bij Hawaï, ontstaat vulkanisme vanwege opstijgend mantelgesteente.
Beredeneer of de snelheid van seismische golven door de mantel onder Hawaï hoger of lager is dan die op plaatsen zonder vulkanisme.

23 Vloeibaar ijzer in de mantel
De mantel bestaat voor een klein deel uit ijzer.
Bepaal met behulp van figuur 17 op welke diepte dat ijzer vloeibaar zou worden.

24 Energiebalans van de aarde
De aarde verliest per jaar $1{,}4 \cdot 10^{21}$ J aan geothermische energie. De aarde ontvangt van de zon per seconde, per vierkante meter oppervlak loodrecht op de stralingsrichting een energie van 1368 J. Dit wordt de zonneconstante genoemd.
a Druk het verlies aan geothermische energie uit als percentage van de energie die de aarde van de zon ontvangt.
b Bereken het geothermische vermogen van de aarde per vierkante meter aardoppervlak.

Dicht aan het aardoppervlak neemt de temperatuur per kilometer diepte toe met 30 °C.
c Bereken de temperatuur onderin het diepste boorgat ter wereld (zie inleiding paragraaf 1).

+25 Smelttemperatuur van ijs
De meeste stoffen krijgen een grotere dichtheid als ze vast worden. Bij een hogere druk zullen ze eerder stollen. De smelttemperatuur neemt toe als de druk hoger wordt. Water krijgt juist een *kleinere* dichtheid als het bevriest (stolt).
Beredeneer wat er gebeurt met de smelttemperatuur van ijs als de druk hoger wordt.

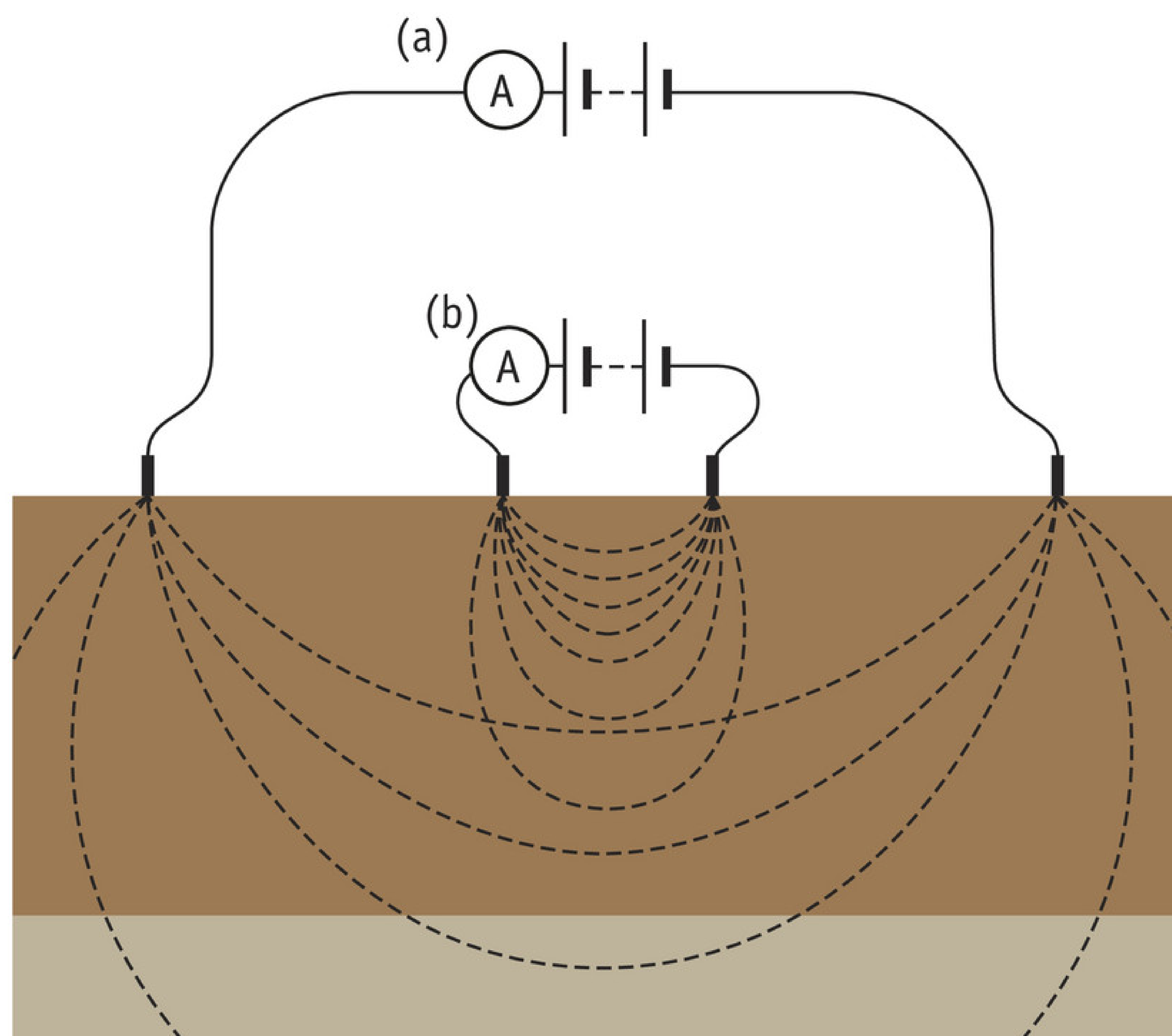
5 Elektromagnetische meetmethoden

In deze paragraaf leer je:
- hoe met elektrische methoden de soortelijke weerstand van de bodem in kaart kan worden gebracht;
- hoe met magnetische methoden de bodem in kaart kan worden gebracht;
- hoe met elektromagnetische methoden en grondradar geleidende stoffen in de bodem gevonden kunnen worden.

Door de elektrische weerstand van de bodem te meten of door het plaatselijke magneetveld gedetailleerd te onderzoeken, kun je aanwijzingen krijgen over wat er in de bodem aanwezig is. Een metaaldetector maakt gebruik van elektromagnetische inductie om te achterhalen wat er in de bodem zit.

Elektrische meetmethoden

Net als koper of ijzer heeft ook een gesteente een zekere **soortelijke weerstand**. Die hangt sterk af van de samenstelling en van de hoeveelheid water in het gesteente. Als het gesteente relatief veel metalen bevat, dan zal de soortelijke weerstand lager zijn. Ook water, met daarin opgeloste zouten, zorgt ervoor dat de soortelijke weerstand van het gesteente lager is. Door de soortelijke weerstand te meten, kan bepaald worden waaruit het gesteente bestaat.
Door twee elektroden in de grond te plaatsen en daar een grote spanning op te zetten, zal er een elektrische stroom gaan lopen door de grond (figuur 18). De grootte van die stroom hangt af van de spanning en van de totale weerstand van de materialen onder de grond. Door tussen verschillende plekken de spanning te meten, is het mogelijk om een idee te krijgen van de soortelijke weerstand van de materialen onder de grond.



▲ **figuur 18** twee elektroden (a) ver uit elkaar en (b) dichter bij elkaar geplaatst

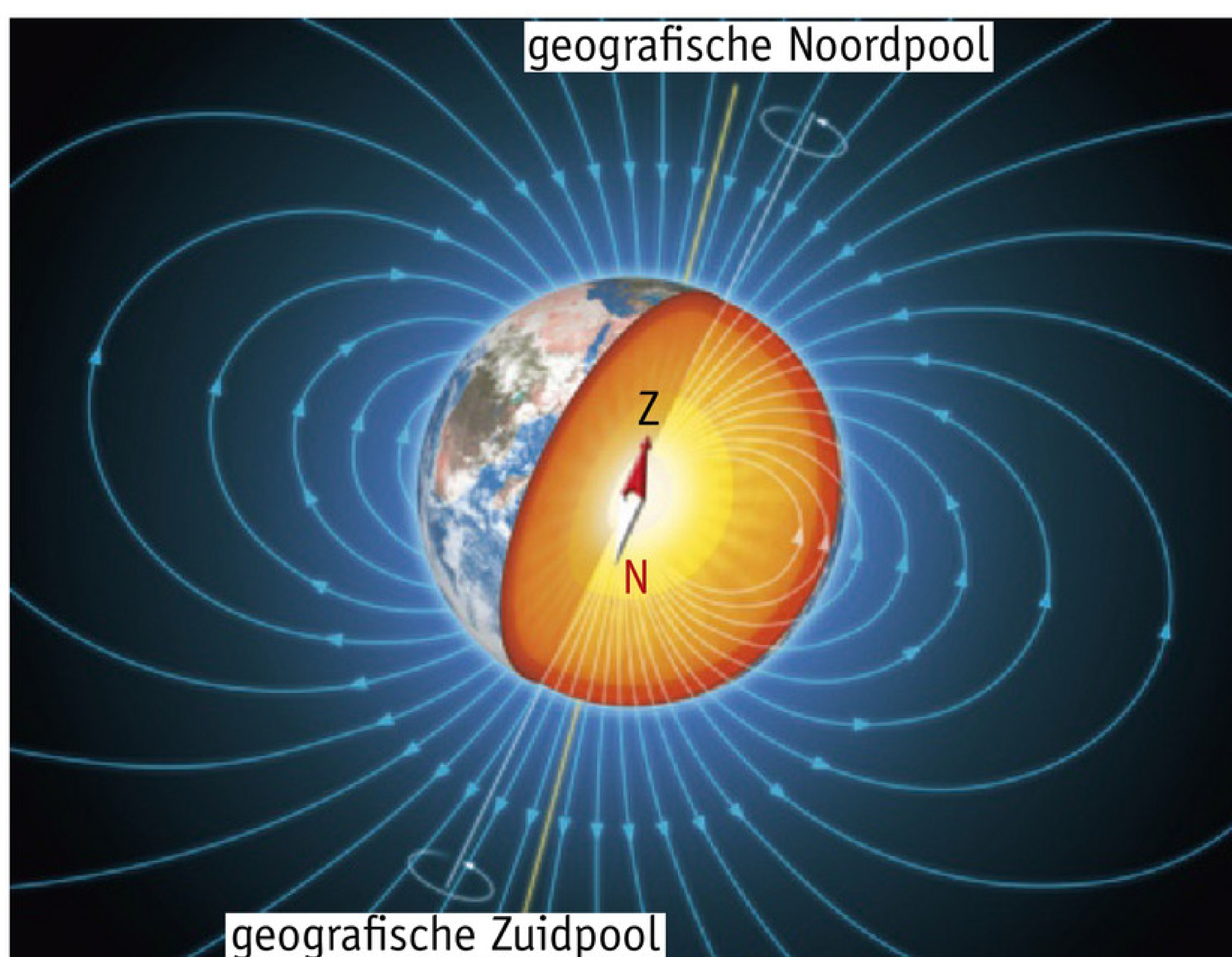
Stel dat een bodemlaag met een grote soortelijke weerstand bovenop een laag met een kleine soortelijke weerstand ligt (figuur 18). In principe kun je dit vergelijken met twee weerstanden die parallel aan elkaar geschakeld zijn. De stroom zal dan voornamelijk door de laag met de kleinste soortelijke weerstand gaan, de onderste laag. De stroom zal echter eerst door de

bovenste laag heen moeten. Dat betekent dat als de elektroden dicht bij elkaar staan, de meeste stroom de onderste laag niet bereikt, waardoor je een grote weerstand meet. Als de elektroden verder van elkaar staan, zal de weerstand wel verlaagd zijn, doordat een deel van de stroom door de laag met een kleine soortelijke weerstand gaat. Door de afstand tussen de meetelektroden telkens te vergroten, kun je op deze manier een diepteprofiel vinden van de weerstand in de bodem. Het is ook mogelijk om de afstand tussen de elektroden gelijk te houden en de hele opstelling te verplaatsen. Zo kun je erachter komen op welke locatie eventueel een afwijkend materiaal in de bodem zit.

▶ **EXPERIMENT 2** De soortelijke weerstand van de bodem (begripspracticum)

Magnetische meetmethoden

Het **aardmagneetveld** wordt opgewekt door convectie in de vloeibare buitenkern. Het exacte mechanisme is nog niet begrepen. Doordat ijzer en nikkel metalen zijn, kunnen elektronen zich min of meer vrij bewegen. Bewegende ladingen kunnen een magneetveld opwekken. Dat magneetveld beïnvloedt weer de beweging van de elektronen. Zo worden elektrische stromen in stand gehouden die het aardmagneetveld opwekken. De geografische Zuidpool van de aarde is een magnetische noordpool (figuur 19). Vanuit hier lopen veldlijnen van het aardmagnetisch veld over de evenaar naar de Noordpool, de magnetische zuidpool. Rond de evenaar lopen ze vrijwel horizontaal. In Nederland maken de veldlijnen een hoek van ongeveer 60° met het aardoppervlak. Deze hoek heet de **inclinatie** van het aardmagnetisch veld.



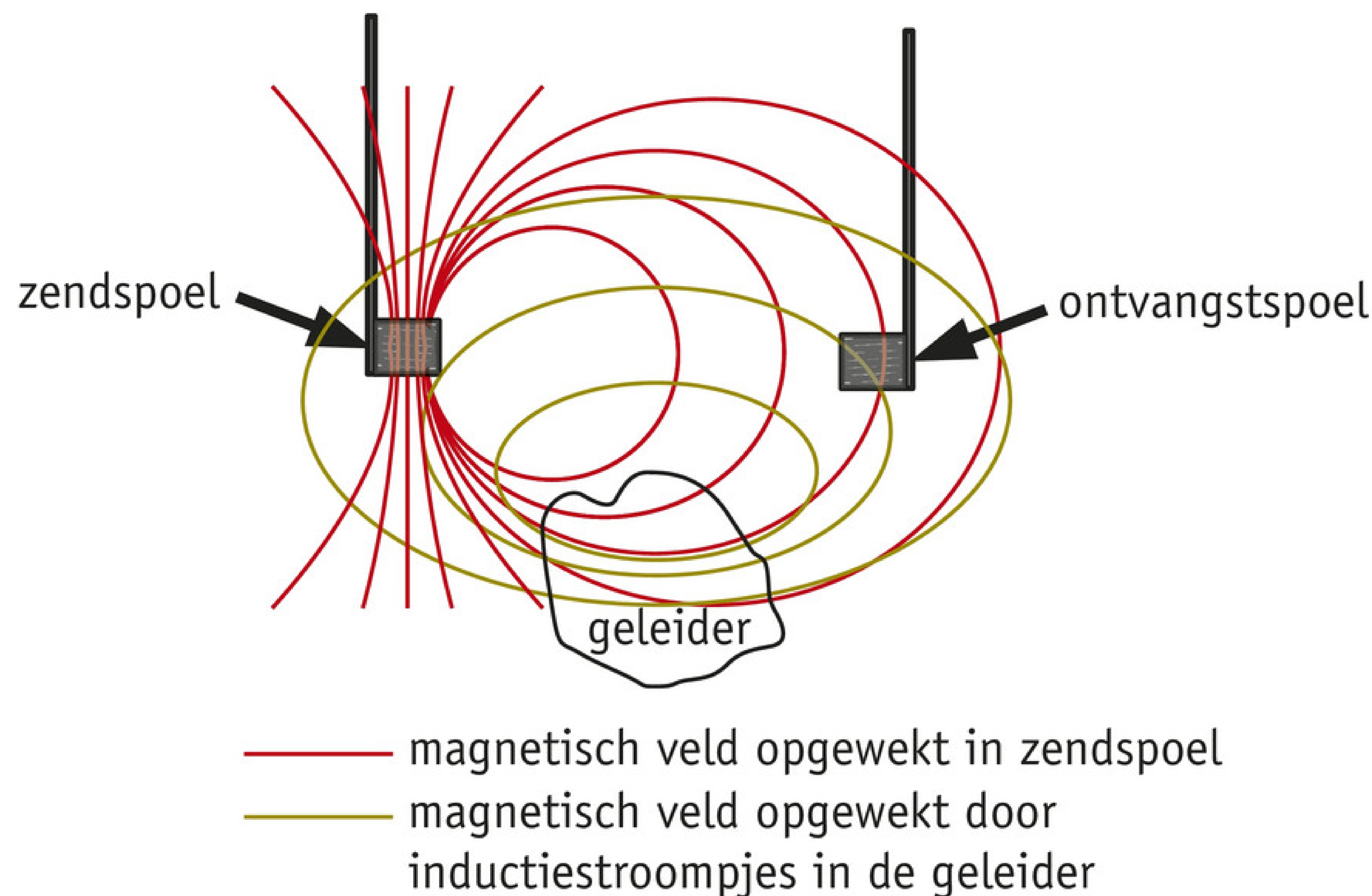
▲ **figuur 19** veldlijnen van het aardmagneetveld

Als je vlak bij een kompas een magnetisch materiaal houdt, dan wijst het kompas niet naar het noorden, maar naar de zuidpool van dit magnetisch materiaal. Het plaatselijk magneetveld is dan veel sterker dan het aardmagneetveld. Veel gesteenten bevatten ijzerverbindingen die sterk magnetische eigenschappen hebben en dus het aardmagnetisch veld beïnvloeden. Bij het zoeken naar olie en gas worden daarom vaak eerst in een groot gebied vanuit een vliegtuig magnetische metingen gedaan, vaak gecombineerd met zwaartekrachtmetingen. Hiermee worden bijvoorbeeld scheuren in rotsformaties in kaart gebracht, of zelfs oude gas- en olie-infrastructuur. Als daarbij een bijzonderheid wordt waargenomen, kan daarna plaatselijk een gerichter en duurder onderzoek uitgevoerd worden, zoals met seismische methoden.

Elektromagnetische meetmethoden

Als je door een spoel een elektrische stroom laat lopen, ontstaat er een magnetisch veld. Als de elektrische stroom verandert, dan verandert dit magneetveld ook. Door dit veranderende veld kan in een tweede spoel een elektrische spanning worden opgewekt.

Dit wordt een **inductiespanning** genoemd. Dit principe wordt gebruikt om elektrisch geleidende stoffen in de grond te vinden. Het wordt bijvoorbeeld gebruikt door schatgravers die je weleens met hun **metaaldetector** op het land van een boer kunt vinden.
De spoel die het magneetveld opwekt wordt de **zendspoel** genoemd, de spoel waarin de inductiespanning wordt opgewekt de **ontvangstspoel**. De zend- en ontvangstspoel kunnen op een vaste afstand van elkaar over een traject worden bewogen. De inductiespanning in de ontvangstspoel blijft steeds hetzelfde, behalve als er een elektrische geleider in de buurt is (figuur 20). Een andere methode gebruikt een zendspoel die bestaat uit een stroomdraad die als één grote lus op de grond ligt. Met de ontvangstspoel loop je binnen deze lus rond en meet je eventuele afwijkingen.



▲ **figuur 20** meten met behulp van elektromagnetisme

▶ **EXPERIMENT 3** Het magnetisch veld rondom voorwerpen in de bodem (begripspracticum)

Radar

Om een beter beeld te krijgen van wat er in de bodem zit, wordt tegenwoordig ook vaak een **grondradar** (*ground penetrating radar*, GPR) gebruikt. Een GPR zendt elektromagnetische straling uit. Als er in de bodem een voorwerp zit dat veel beter elektrisch geleidend is dan de rest van de bodem, zoals een metalen leiding of een gesteente met een lage soortelijke weerstand, zal de elektromagnetische straling gedeeltelijk worden gereflecteerd. Deze reflecties worden opgevangen en er wordt zeer nauwkeurig gemeten wat het tijdverschil is tussen de uitgezonden straling en de opgevangen straling. Dat geeft een maat voor de afstand van het voorwerp naar de grondradar.

Onthoud!

- Verschillende gesteenten hebben verschillende soortelijke weerstanden. Water en metalen in het gesteente verlagen over het algemeen de weerstand. Door de soortelijke weerstand van de grond te meten kan een dwarsdoorsnede van de bodem worden gemaakt.
- Het aardmagneetveld ontstaat in het binnenste van de aarde, door stromingen van elektronen in het ijzer en nikkel van de vloeibare buitenkern.
- Door het meten van afwijkingen van het aardmagnetisch veld kan een beeld worden gekregen van de structuur van de bodem of de aanwezigheid van oude leidingen.
- Elektromagnetische methoden werken op basis van het opwekken van inductiespanning door een veranderend magneetveld. Zo kunnen geleidende stoffen in de grond gevonden worden.
- Een grondradar werkt met elektromagnetische straling die door geleidende stoffen in de grond wordt gereflecteerd.

Opdrachten

26 Mars en Venus

Mars en Venus hebben geen of een heel zwak magneetveld.
Beredeneer wat je hieruit kunt afleiden over de eigenschappen van het inwendige van deze planeten.

27 Wisselspanning

Bij elektromagnetische methoden wordt gebruikgemaakt van een wisselspanning.
Leg uit waarom hiervoor een wisselspanning nodig is.

28 Kompassen

Kompassen die in Nederland worden verkocht houden rekening met de inclinatie van het aardmagneetveld zodat de naald horizontaal wijst en niet, net als het veld, een hoek van 60° met het aardoppervlak maakt.

a Beredeneer welke aanpassing de fabrikant aan een kompasnaald maakt om dat voor elkaar te krijgen.

b Beredeneer wat er met de kompasnaald gebeurt als het kompas uit Nederland in bijvoorbeeld Zuid-Afrika wordt gebruikt.

29 Soortelijke weerstand

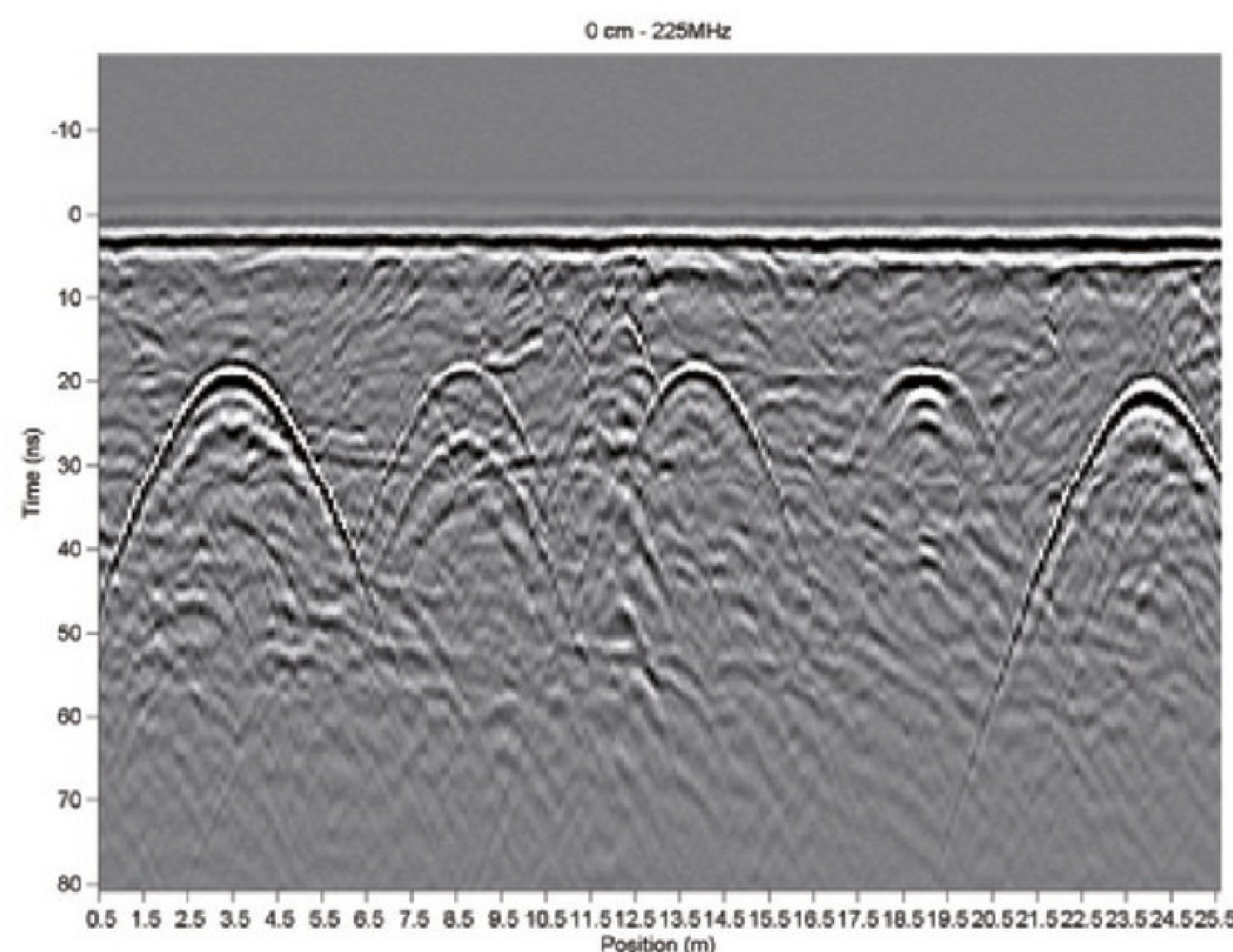
De soortelijke weerstand is een stofeigenschap. De bodem bestaat echter nooit uit één stof, maar uit een combinatie van meerdere stoffen: gesteenten, mineralen, water en daarin opgeloste zouten. Daarom wordt bij de bodem gesproken van een schijnbare soortelijke weerstand. De schijnbare soortelijke weerstand komt alleen overeen met de echte soortelijke weerstand als de bodem uit één stof bestaat.
Schets voor de volgende situaties hoe de schijnbare soortelijke weerstand afhangt van de afstand tussen de elektroden.

a als er een laag met een hoge soortelijke weerstand ligt boven een laag met een lage soortelijke weerstand

b als er een laag met een lage soortelijke weerstand ligt boven een laag met een hoge soortelijke weerstand

30 Grondradar

In figuur 21 zie je een beeld dat met een grondradar is gemaakt.
Leg uit waarom een geleider in de bodem zo'n gebogen vorm laat zien.



▲ **figuur 21** beeld gemaakt met een grondradar: de positie daarvan staat langs de *x*-as

+31 Schijnbare soortelijke weerstand bepalen
Bij het meten van de schijnbare soortelijke weerstand wordt een spanning over de elektroden aangebracht waardoor een stroom door de bodem gaat lopen.

a Beschrijf de experimentele methode en de berekeningen die moeten worden gedaan om vervolgens de schijnbare soortelijke weerstand te kunnen berekenen.

b Leg uit of de grootte van de stroom die de bodem in gaat van invloed is op de gemeten schijnbare soortelijke weerstand.

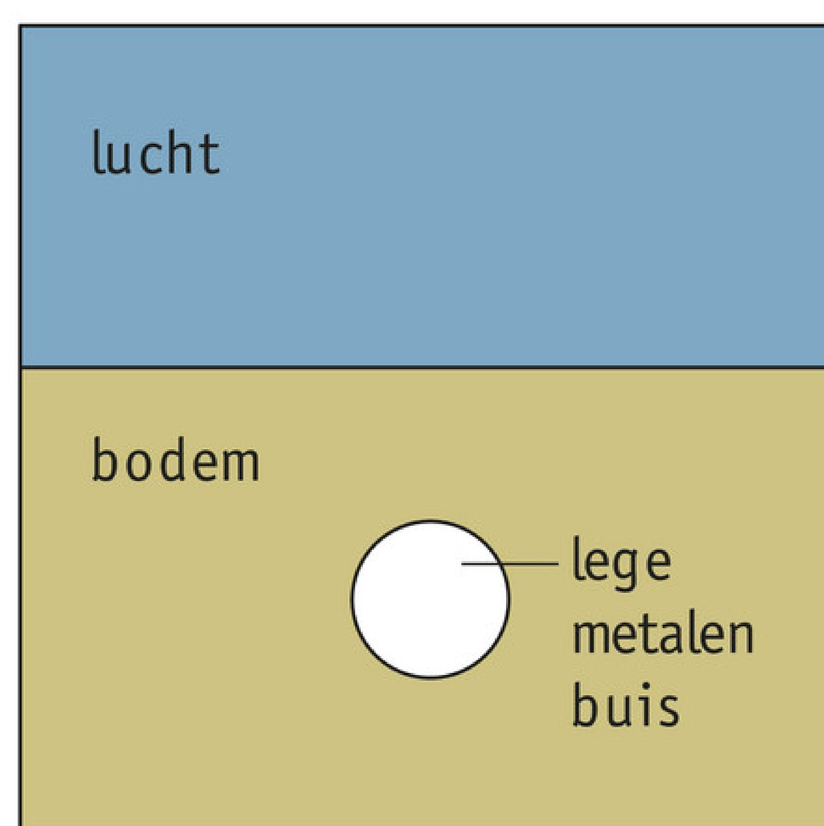
Eindopdracht

32 Modelberekeningen
Voor het interpreteren van geofysisch onderzoek worden vaak modelberekeningen gebruikt. Op die manier kun je zien hoe een bepaalde opbouw van de bodem in de geofysische metingen tot uiting komt.
In figuur 22 tot en met 25 zie je een aantal geologische profielen (een soort dwarsdoorsneden door de bodem). Het zijn vereenvoudigde profielen die een model kunnen zijn voor echte situaties.
Lees de opdracht bij elk van de vier situaties. Schets bij ieder profiel hoe de gemeten waarden eruit zullen zien als je aan het oppervlak de gevraagde metingen zou doen. Het gaat hier niet om de exacte waarden die je meet, maar om de vorm die een grafiek van een aantal metingen zou hebben.

a Schets in grafiek 22 de grafiek van een zwaartekrachtmeting boven een lege metalen buis (dus niet gevuld met aarde) die in de bodem begraven is. Neem voor de *x*-as de scheidslijn tussen lucht en bodem. Laat de grafiek aan de linkerkant van de tekening beginnen en trek de lijn door naar de rechterkant.

b Schets in grafiek 23 de grafiek van de gemeten weerstand als je de hele opstelling met twee elektroden verplaatst over dit profiel. De afstand tussen de elektroden blijft gelijk.

c Schets in figuur 23 ook de grafiek van de gemeten weerstand als de afstand tussen de elektroden telkens vergroot wordt. Eén elektrode blijft aan de linkerkant terwijl de andere naar rechts schuift.



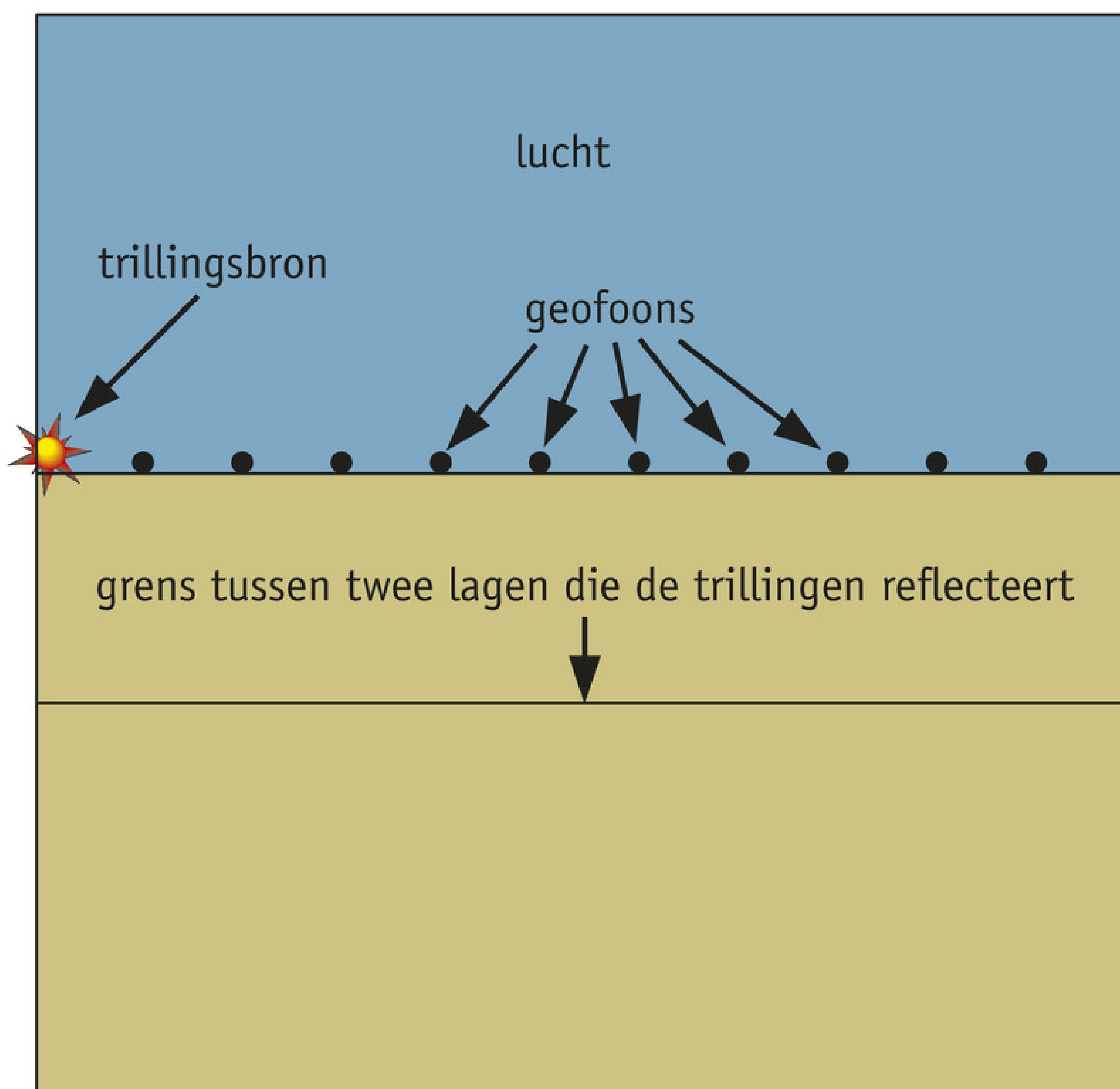
▲ **figuur 22**



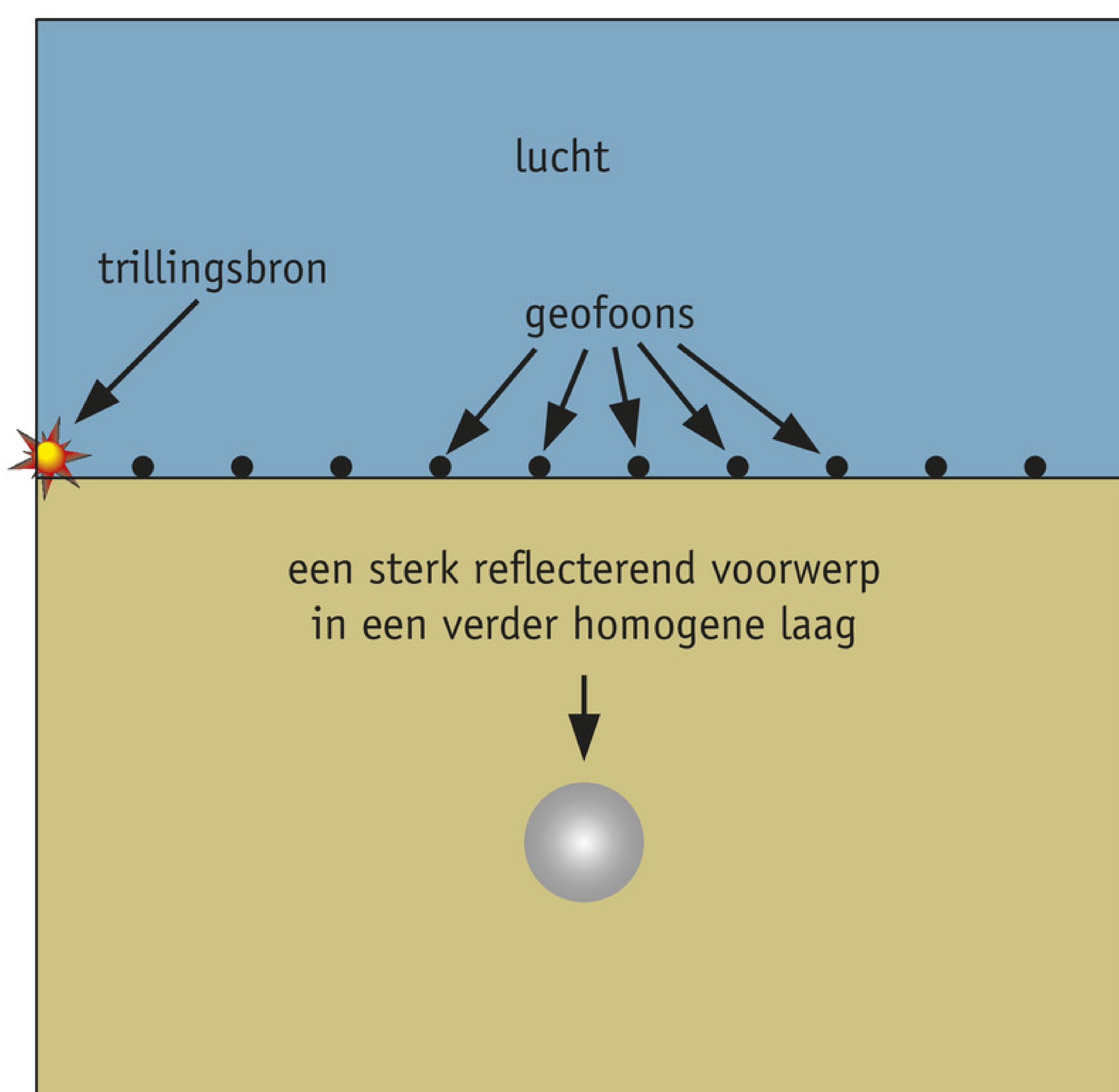
▲ **figuur 23**

d Teken in figuur 24 de grafiek van de aankomsttijden van de gereflecteerde trillingen bij de verschillende geofoons.

e Schets in figuur 25 de grafiek van de aankomsttijden van de gereflecteerde trillingen bij de verschillende geofoons.



▲ **figuur 24**



▲ **figuur 25**

Maak de online diagnostische toets (Test jezelf).

6 Practicum

EXPERIMENT 1 Trillingen meten met een versnellingsmeter (begripspracticum)

Inleiding
Bij een aardbeving gaat de grond trillen en beweegt dan heen en weer. De grond versnelt daarbij. In dit practicum simuleer je een aardbeving en gebruik je je smartphone als seismometer om die versnellingen te meten. Je kunt dit practicum ook uitvoeren met een versnellingssensor gekoppeld aan een (meet)computer.

Onderzoeksvraag
Hoe zijn de trillingen in verschillende ondergronden met een versnellingssensor te meten?

Benodigdheden
smartphone of tablet met versnellingssensor en app om een grafiek te maken van de waarden die de versnellingssensor meet (of een versnellingssensor gekoppeld aan een (meet-)computer); meetlint

Uitvoering
Indien mogelijk voer je dit experiment buiten en binnen uit. Herhaal het experiment op verschillende ondergronden, bijvoorbeeld op tegels, op een kale zandbodem en op gras (buiten), en op een betonvloer of een houten vloer (binnen).

- Leg de versnellingssensor op de grond.
- Zet de app aan.
- Loop langs de sensor en kijk of je voetstappen te zien zijn in de grafiek.
- Meet tot welke afstand gewoon lopen gedetecteerd kan worden.
- Spring op enige afstand van de sensor op de grond.
- Meet tot welke afstand je een sprong kunt detecteren met de versnellingssensor.

Verwerking

1 Hoe verschillen de gemeten afstanden voor de verschillende ondergronden? Kun je hier een verklaring voor geven?
2 Beredeneer of de trillingen die je meet P-golven, S-golven of oppervlaktegolven zijn.

Conclusie
3 Beantwoord de onderzoeksvraag.

EXPERIMENT 2 De soortelijke weerstand van de bodem (begripspracticum)

Inleiding
Bij elektrische weerstandsmetingen wordt de schijnbare soortelijke weerstand gemeten tussen een aantal elektroden (zie opdracht 29). In dit experiment ga je kijken of dat ook lukt op een kleine schaal. In werkelijkheid worden er minimaal vier grondelektroden gebruikt: twee om een stroom te laten lopen, twee om de spanning op verschillende plaatsen te meten. Dat geeft betrouwbare resultaten, maar het is ook wat ingewikkeld. Daarom gebruik je in dit practicum een opstelling met twee grondelektroden (figuur 18).

Onderzoeksvragen
1 Is de schijnbare soortelijke weerstand van diverse soorten bodems klein genoeg om daar betrouwbare metingen aan te kunnen doen?
2 Zijn er verschillen waarneembaar in de schijnbare soortelijke weerstand tussen verschillende bodemsoorten?

Benodigdheden
spanningsbron (6 V, gelijkspanning); aansluitdraden; twee grondelektroden (bij voorkeur messing of roestvrij staal); stroommeter; spanningsmeter; bakken met verschillende soorten ‘bodem’: droog zand, nat zand, nat zand met een kleine hoeveelheid keukenzout, tuinaarde, klei en/of andere bodemsoorten; meetlint

Uitvoering
- Sluit de stroom- en spanningsmeter aan op de spanningsbron. Sluit ook de grondelektroden aan en zorg dat ze gemakkelijk te verplaatsen zijn. Stel de spanningsbron in op 6 V.
- Vul de bakken met de verschillende bodemsoorten. Voer voor elke bodem metingen uit. Noteer je meetwaarden in een tabel met kolommen voor de spanning, stroomsterkte, weerstand (uit te rekenen) en de afstand tussen

de grondelektroden en de schijnbare soortelijke weerstand (uit te rekenen).

- Geef in de bak tien punten op een rechte lijn aan op gelijke afstand van elkaar.
- Zet de twee grondelektroden op de twee buitenste punten in de grond en meet de spanning en de stroomsterkte.
- Verplaats de grondelektroden naar de volgende twee punten. Meet opnieuw de spanning en de stroomsterkte tussen deze twee punten. Herhaal dit tot je bij de twee middelste punten bent. Je hebt dan in totaal vijf metingen gedaan.

Verwerking

1 Reken voor alle metingen de weerstand uit en vervolgens de schijnbare soortelijke weerstand met de formule: $\rho = 2\pi \cdot a \cdot R$, waarbij a de afstand tussen de grondelektroden is en R de bijbehorende weerstand.
2 Welke bodem heeft de laagste soortelijke weerstand?
3 Waren er bodems waarbij het niet lukte de spanning te meten? Geef hiervoor een mogelijke verklaring.
4 Hebben de grafieken voor de verschillende soorten bodems dezelfde vorm?

Conclusie

5 Beantwoord de onderzoeksvragen.

EXPERIMENT 3 Het magnetisch veld rondom voorwerpen in de bodem (begripspracticum)

Inleiding

Met magnetische en elektromagnetische metingen kun je sommige voorwerpen die in de bodem verstopt zitten, opsporen. In dit practicum kom je erachter hoe dat werkt en welke voorwerpen je met deze methoden wel en niet kunt opsporen.

Onderzoeksvraag

Welk type voorwerpen kun je opsporen met magnetische en welke met elektromagnetische metingen?

Benodigdheden

bak met zand; blokjes van hout, ijzer, koper en aluminium; magnetische sensor, aangesloten op een (meet)-computer; kompas; eventueel smartphone met app om de magnetische veldsterkte te meten; twee spoelen (als zend- en meetspoel); voedingskast met wisselspanning; een spanningsmeter; drukschakelaar

Uitvoering

- Sluit één spoel (de zendspoel) in serie met de drukschakelaar aan op de wisselspanningsbron. De drukschakelaar voorkomt dat er continu een stroom door de zendspoel loopt en dat deze daardoor te warm wordt. Stel de bron in op een spanning van enkele volt.
- Houd de tweede spoel (de ontvangstspoel) naast de zendspoel.
- Sluit de spanningsmeter aan op de ontvangstspoel.
- Begraaf steeds een van de voorwerpen vlak onder de oppervlakte van het zand. Herhaal vervolgens onderstaande metingen.
- Meet over de lengte van de bak op een aantal punten de magnetische veldsterkte.
- Kijk of het kompas ergens in de bak een afwijking geeft.
- Beweeg de twee spoelen vlak over het zandoppervlak. Houd daarbij de windingen horizontaal aan het oppervlak. Meet de spanning van de ontvangstspoel.

Verwerking

1 Welke blokjes veroorzaken een afwijking in de magnetische veldsterkte?
2 Welke blokjes hebben invloed op de spanning in de ontvangstspoel?
3 Hoe precies is met elk van deze methoden de positie van de voorwerpen te bepalen?

Conclusie

4 Beantwoord de onderzoeksvraag.

Je docent beslist of je de volgende experimenten uitvoert volgens de instructies of dat je de uitgebreide omschrijving krijgt.

EXPERIMENT 4 De werking van een geofoon (begripspracticum)

Inleiding
Met een geofoon worden bij seismisch onderzoek de trillingen van de bodem gemeten. Een geofoon bestaat uit een spoel die aan een veer is opgehangen rondom een vaste magneet. Bij een trilling van de bodem beweegt de magneet, terwijl de spoel door de traagheid stil blijft hangen.

Onderzoeksvraag
Hoe kun je trillingen van de bodem meten met een spoel en een magneet?

EXPERIMENT 5 Convectie in een vloeistof (begripspracticum)

Inleiding
Convectie speelt een belangrijke rol in het inwendige van de aarde. In de mantel treedt convectie op, terwijl de gesteenten in de mantel vast zijn. In een practicum lukt het niet om convectie in een vaste stof te laten optreden, maar door de convectie in een vloeistof te onderzoeken, zijn er toch belangrijke inzichten over convectie in de mantel te krijgen.

Onderzoeksvraag
Hoe ziet convectiestroming eruit: waar is opwaartse stroming, waar neerwaartse stroming en waar is de stroming horizontaal?

ONDERZOEK Bouw je eigen seismometer

Inleiding
In figuur 6 zie je het principe van een seismometer: de relatieve beweging van een (trage) massa ten opzichte van de ondergrond wordt nauwkeurig geregistreerd. In moderne seismometers wordt hiervoor een magneet gebruikt die ten opzichte van een spoeltje beweegt. In het spoeltje wordt zo een inductiespanning opgewekt (zie paragraaf 5). Dit elektrische signaal wordt door een computer geregistreerd als functie van de tijd. Ditzelfde principe wordt in een microfoon gebruikt. In een luidspreker gebeurt het omgekeerde: een elektrisch signaal zorgt voor de beweging van de conus van een luidspreker. Maar je kunt de luidspreker ook als een soort microfoon en dus als een soort seismometer gebruiken. In dit open onderzoek bouw je en test je je eigen seismometer.

Onderzoeksvraag
Welke trillingen en/of aardbevingen zijn met een eigengemaakte seismometer te meten?

Praktisch
Zoek op internet naar ontwerpen van seismometers op basis van een luidspreker. Je kunt een oude luidspreker gebruiken en andere materialen die je later weer kunt hergebruiken. Zorg dat je begrijpt hoe het ontwerp in elkaar zit. Pas het ontwerp eventueel aan om het te verbeteren. Zoek op de website van het KNMI naar seismogrammen die je vergelijkt met de seismogrammen die je met jouw seismometer hebt gemeten.

Conclusie
Beantwoord de onderzoeksvraag.

Antwoorden

Hier vind je de numerieke antwoorden op de vragen in het boek.
De volledige uitwerkingen staan in het uitwerkingenboek.

4 Elektrische systemen

Praktijk

1 a $> 1{,}4 \cdot 10^{20}\ \Omega$
b $2{,}2 \cdot 10^{-2}\ \Omega$
d $8{,}5 \cdot 10^{-1}\ \Omega$
3 c $1 \cdot 10^{-9}$ kg
d $1 \cdot 10^{2}\ \Omega$
e 0,1 μA

Theorie

2 a $1{,}4 \cdot 10^{-18}$ J
b $1{,}6 \cdot 10^{18}$ elektronen per seconde
c 2,3 W
4 a 3,91 A
b $4{,}7 \cdot 10^{2}$ C
c $1{,}1 \cdot 10^{5}$ J
5 b $1{,}1 \cdot 10^{2}$ kWh
d $1{,}8 \cdot 10^{2}$ kWh
6 a $2{,}4 \cdot 10^{-3}$ kWh
b 10 h
c 63%
8 a 6,6 J
b 55%
c 100%
10 a 0,50 ms
b 33 MV
c $0{,}99 \cdot 10^{12}$ W
d $4{,}3 \cdot 10^{9}$ A
14 b 19^2
15 a 3,4 Ω
b 0,66 W
17 a $2{,}0 \cdot 10^{2}$ W
c 2,4 min
19 a $1{,}9 \cdot 10^{-5}$A
20 a $3{,}0 \cdot 10^{-6}$ A
21 8,0 Ω
27 a 0,042 Ω
b 0,012 V
c 3,4 mJ
28 1,1 mm
29 a $4{,}5 \cdot 10^{-7}\ \Omega$ m
30 b $1{,}5 \cdot 10^{-1}\ \Omega$
31 a 0,50 Ω
b 4,0 Ω
c 1,3 Ω
32 a $n \cdot R$
b $\frac{R}{n}$
33 a $6{,}9 \cdot 10^{3}$ A
c $1{,}73 \cdot 10^{3}$ A
d 0,26 Ω
e 0,78 MW
35 a 23 Ω
c 21 m
37 a 10,0 A
b 1,4 kW
38 a 2,0 A
b 1,5 A
c 1,3 A
d 1,3 A
e 1,2 A
39 a 0,75 Ω
40 a $U_1 = 17$ V, $U_2 = 20$ V, $U_3 = 20$ V, $I_1 = 1{,}7$ A, $I_2 = 1{,}0$ A, $I_3 = 0{,}67$ A
b $I_{tot} = 1{,}7$ A; $U_{tot} = 37$ V
41 a 70 auto's per minuut
44 $I_1 = I_3 = 4{,}0$ A, $I_2 = 3{,}0$ A, $I_4 = I_5 = I_6 = 1{,}0$ A
45 121,6 Ω
48 e ongeveer 17 mΩ
f 23 Ω
g 1,7 W
53 b $2{,}5 - \frac{1}{2}R_{AP}$
c $1{,}25 + \frac{3}{4}R_{AP}$
d 3,7 Ω
e 0,89 m
58 a 3,7 kW
60 c $3{,}0 \cdot 10^{2}\ \Omega$
63 d 64 Ω
e 8,1 W
f 0,080 mm

5 Biofysica: de natuurkunde van het leven

Theorie

1 a 0,94 m s^{-1}
b 1,2 m s^{-1}
4 a 147 km = $1{,}5 \cdot 10^{5}$ m
+5 a formule C
6 a $Fr_{Johan} = 0{,}45$; $Fr_{Erwin} = 0{,}78$
b 5,3 km h^{-1}
11 b A
15 b 0,5 lichaamslengten per seconde
c 180 km h^{-1}
16 a 14 μm s^{-1}
b 26 μm
c ongeveer 27 s
d 0,96 μm s^{-1}
18 a $1{,}9 \cdot 10^{-16}$ C
b $1{,}9 \cdot 10^{-14}$ A
c $3{,}2 \cdot 10^{-15}$ W
19 a $5{,}03 \cdot 10^{-4}$ m s^{-1}
b $-4{,}7 \cdot 10^{-12}$ N
20 87%
23 a 0,14 s
d 6,9%, 28% en 62%
f –6 pA
24 a $1{,}7 \cdot 10^{2}$ pA
26 a 25 pN
b 200 nm
+27b 8,6 pN
c 8,6 pN naar links

6 Geofysica: de natuurkunde van de aarde

Praktijk

1 **a** 0,22 mm
b 1,1 m (= 110 cm)
3 **a** 1,5 s
b 1,6 s

Theorie

8 **c** $\delta g = -1{,}967 \cdot 10^{-6} \cdot h$
9 **a** s^{-2}
b $1{,}132 \cdot 10^{-6} \cdot h$
10 **b** 9,816 $m\,s^{-2}$
11 **a** 29,9 cm
b 30,000 000 3 cm
15 **a** $2{,}94 \cdot 10^3$ km
b $3{,}7 \cdot 10^3$ km
18 **a** $3{,}0 \cdot 10^3$ km, $2{,}0 \cdot 10^3$ km en $1{,}0 \cdot 10^3$ km
c $40 \cdot 10^3$ km h^{-1}
+19 $11 \cdot 10^3$ km
23 500 km
24 **a** 0,025%
b $8{,}7 \cdot 10^{-2}$ W m^{-2}
c 382 °C

Register

Colofon

Auteurs
Hans van Bemmel
Lodewijk Koopman

Eindredactie
Claud Biemans

Met medewerking van
Peter van Hoeflaken
Rein Tromp

Ontwerp
Uitgeverij Malmberg, ’s-Hertogenbosch

Foto omslag
Getty/Image Source/Alan Kearney

Opmaak
Nieuwe Stijl, Den Haag

Opmaak Release
Pointer grafische vormgeving, Geldrop

Beeldverwerving
B en U International Picture Service, Amsterdam

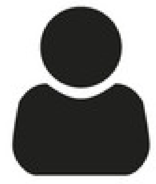
Illustraties
Sittrop Grafisch Realisatiebureau, Rotterdam: p. 7 boven
Erik Eshuis Infographics, Groningen: overige illustraties

Foto's
Imageselect, Wassenaar: p. 60
Shutterstock: p. 13, 52, 85
Science Photo Library / ANP Photo, Den Haag: p. 23, 51, 88, 110
Getty Images, p. 5, 55 (2x)
123 RF: p. 28
Fresh Images / BSR Agency, Haarlem: p. 54
Wikimedia Commons: p. 8, 90, 103
www.openmicroscopy.org: p. 66
Construction Photography: p. 92

978 94 020 6876 4
Release 2021, eerste oplage

MALMBERG

MAX



Je mag dit boek houden.
Handig als naslagwerk.



Je mag in dit boek schrijven
en aantekeningen maken.



Je hebt ook toegang tot
de online leeromgeving.

AUTEURS

Hans van Bemmel

Lodewijk Koopman

EINDREDACTIE

Claud Biemans

MET MEDEWERKING VAN

Peter van Hoeflaken

Rein Tromp

